

(2)特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局(43) 国際公開日  
2004 年 4 月 29 日 (29.04.2004)

PCT

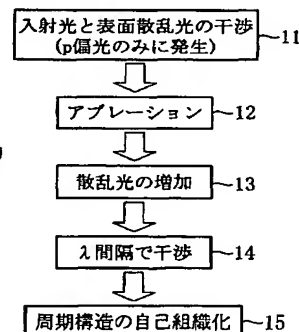
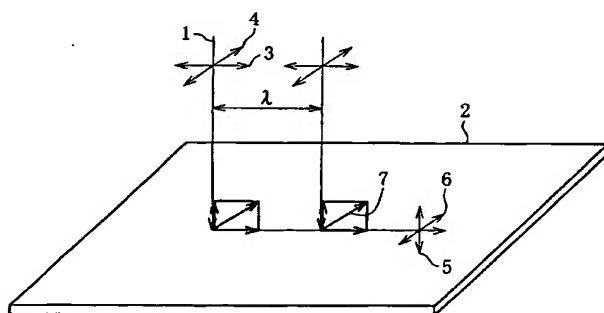
(10) 国際公開番号  
WO 2004/035255 A1

- (51) 国際特許分類<sup>7</sup>: B23K 26/00, C23F 4/02
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2003/012308
- (22) 国際出願日: 2003 年 9 月 25 日 (25.09.2003)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願2002-283954 2002 年 9 月 27 日 (27.09.2002) JP  
特願 2002-344478  
2002 年 11 月 27 日 (27.11.2002) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): エヌイーシーマシナリー株式会社 (NEC MACHINERY CORPORATION) [JP/JP]; 〒525-8511 滋賀県 草津市 南山田町字縄手崎 8 5 番地 Shiga (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 沢田 博司 (SAWADA, Hiroshi) [JP/JP]; 〒525-8511 滋賀県 草津市 南山田町字縄手崎 8 5 番地 エヌイーシーマシナリー株式会社内 Shiga (JP). 黒澤 宏 (KUROSAWA, Kou) [JP/JP]; 〒889-2152 宮崎県 宮崎市 学園木花台北 1 丁目 6 番地 1 7 Miyazaki (JP).
- (74) 代理人: 江原 省吾, 外 (EHARA, Syogo et al.); 〒550-0002 大阪府 大阪市 西区江戸堀 1 丁目 1 5 番 2 6 号 江原特許事務所 Osaka (JP).
- (81) 指定国 (国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ,

[続葉有]

(54) Title: CYCLIC STRUCTURE FORMATION METHOD AND SURFACE TREATMENT METHOD

(54) 発明の名称: 周期構造作成方法および表面処理方法



- 11...INTERFERENCE OF INCIDENT LIGHT WITH SURFACE  
SCATTERED LIGHT (GENERATED ONLY IN  $p$  POLARIZATION)
- 12...ABRASION
- 13...INCREASE IN SCATTERED LIGHT
- 14...INTERFERENCE AT INTERVAL OF  $\lambda$
- 15...SELF-ORGANIZATION OF CYCLIC STRUCTURE

(57) Abstract: A cyclic structure formation method for continuously and widely forming a cyclic structure by using a uniaxial laser beam, comprising the steps of radiating the laser beam (1) having a threshold near a finishing threshold to a specimen (2), overlappingly scanning the laser beam thereon to increase scattered light (13) by an abrasion (12) due to the interference (11) of incident light with the scattered light along the surface of the material of the specimen so as to cause the interference at an interval equal to the wavelength  $\lambda$  of the laser beam (1)(14) in order to self-organizingly form the cyclic structure (15), wherein the cyclic pitch of the formed cyclic structure is changed by changing the incident angle of the laser beam (1) on the surface of the specimen (2), and when the incident light of the laser beam (1) on the surface of the specimen (2) has an angle, the cyclic pitch thereof can be changed by changing the scanning direction thereof.

(57) 要約: 解決すべき課題は、一軸のレーザを用いて、連続的、かつ、広範囲に周期構造を形成することである。解決手段は、一軸で、かつ加工閾値近傍のレーザ 1 を試料 2 に照射し、オーバーラップさせながら走査して、入射光

[続葉有]

BEST AVAILABLE COPY

WO 2004/035255 A1



NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ特許 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR),

添付公開書類:

— 国際調査報告書

2 文字コード及び他の略語については、定期発行される各 PCT ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

と材料表面に沿った散乱光との干渉 (11) によるアブレーション (12) によって、散乱光を増大させて (13)、レーザ 1 の波長 λ 間隔で干渉を起こさせて (14)、自己組織的に周期構造を作成することである (15)。作成される周期構造は、レーザ 1 の試料 2 表面への入射角を変更することによって、その周期ピッチが変更される。またレーザ 1 の試料 2 表面への入射光が角度を有する場合は、その走査方向を変更することによって、その周期ピッチが変更される。

## 明 細 書

## 周期構造作成方法および表面処理方法

## 技 術 分 野

本発明は周期構造作成方法および表面処理方法に関し、特に材料表面に一軸のレーザを照射して、微細な凹凸を周期的に形成する周期構造作成方法および材料表面にレーザを照射して周期構造を作成することにより材料表面特性を変化させる表面処理方法に関するものである。

## 従 来 技 術

近年、従来の機械と比較すると2桁以上小さい寸法の部品から構成されているマイクロマシンの研究が活発に行なわれている。重力等の慣性力は寸法の3乗に比例するが、表面力は寸法の2乗に比例するため、マイクロマシンのような小さな部品の動作時には、重力の影響よりも、2物体間に作用する表面力の影響が顕在化してくる。特に、2物体の界面間に大気中の水分が凝縮した水の表面張力（メニスカス力）に起因する引き離し力（凝着力）が、摩擦力に支配的な影響を与えることが知られている（例えば、非特許文献1参照。）。また、この引き離し力は、表面の微細な凹凸により大きく低減できることが知られている（例えば、非特許文献2参照。）。

さらに、微細な凹凸は、摩耗の抑制や潤滑剤の保持機能による長寿命化に著しい効果があることも報告されており（例えば、非特許文献3参照）、表面にナノスケールの微細構造を形成する加工法の開発が望まれている。

一方、加工閾値近傍のフルエンスで直線偏光のレーザをポリマに照射すると、グレーティング状の微細周期構造が形成されることが知られている（例えば、非特許文献4，5，6参照）。また、金属や半導体にも同様の微細周期構造が形成でき、照射角度により、そ

の周期ピッチが変化することが報告されている（例えば、非特許文献 7，8 参照）。

いずれも、波長オーダーの周期構造が自己組織的に形成されるが、その範囲はレーザスポット内に限られている。したがって、その応用範囲も極狭い領域に限定される。もし、この周期構造を各種材料に対して広範囲に形成できれば、トライボロジー特性の改善に有効な加工法となる。さらにフェムト秒レーザを用いることで、熱影響による材料特性の劣化が現われやすい小型部品や、非常に薄い部品にも適用することが可能になる。

さらに、チタンサファイアレーザを集光した高強度のフェムト秒パルスで、2 つに分割してこれら 2 軸レーザの干渉によって、微細な周期構造を形成すること、および材料を X-Y ステージに取りつけて、レーザの繰り返し周波数と同期させて走査することによって、材料全体に周期構造を形成することが報告されている（例えば、非特許文献 9 参照）。

【非特許文献 1】

安藤泰久，田中敏幸，伊能二郎，角田和雄：ナノメートルスケールの表面形状と摩擦力・引き離し力の関係，日本機械学会論文集（C 編），65,637(1990) P.306.

【非特許文献 2】

K.N.G.Fuller and D.Taber, :The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids, Proc.Roy.Soc.Lond., A, 345, (1975) P.327.

【非特許文献 3】

M.Maillat, S.M.Pimenov, G.A.Shafeev and A.V.Simakin, Tribol Lett., 4, (1998), P. 237.

【非特許文献 4】

P.E.Dyer and R.J.Farley: Periodic surface structures in the excimer laser ablative etching polymers., Appl.Phys.Lett., 57, 8(1990) P.765.

【非特許文献 5】

H.hiraoka and M.Sendova: Laser-induced sub-half-micrometer periodic structure on polymer surfaces., App.Phys.Lett., 64, 5(1994) P.563.

【非特許文献 6】

M.Bolle and S.Lazare: Submicron periodic structures produced on polymer

surfaces with polarized excimer laser ultraviolet radiation, Appl. Phys. Lett., 60, 6(1992)P.674.

【非特許文献 7】

A.E.Siegman, P.M.Fauchet: Stimulated Wood's anomalies on laser-illuminated surfaces, IEEE J. Quantum Electron., QE-20, 8(1986)P.1384.

【非特許文献 8】

南志昌, 豊田浩一: レーザー誘起表面電磁波による金属・半導体のリップル形成入射角依存性, レーザー研究, 28, 12(2000)P.824.

【非特許文献 9】

河村賢一, 平野正浩, 細野秀雄: フェムト秒レーザーのシングルパルス干渉露光による無機材料の微細加工とその応用, レーザー研究, 30, 5(2002)P.244.

## 発 明 の 開 示

### 発明が解決しようとする課題

上記の非特許文献 9 に記載されている 2 軸レーザーによる干渉を用いる方法では、レーザーを分割して 2 軸レーザーを形成することが必須で、しかも、その光路差を厳密に等しくする必要があるのみならず、レーザーの走査速度を周期構造の周期ピッチに厳密に対応させる必要があり、光軸管理などが極めて煩雑であり、また装置が複雑・高価になる。さらに、2 光路に角度を持たせて干渉させるため平面にしか加工ができない上、もし、材料を支持するテーブルが振動すると、周期構造のピッチが乱れるという解決すべき課題があった。

また、上記の非特許文献 1～9 に記載されている周期構造の作成方法では、簡単に、しかも広範囲に正確な周期ピッチの周期構造を作成することが困難であり、したがって、その効果も不明確であり、具体的な応用は考えられていないという解決すべき課題があった。

そこで、本発明は、上述のような 2 軸レーザーを使用することなく、各種材料表面に一軸のレーザーを照射して周期構造を作成できる周期構造作成方法を提供することを目的とする。

また、本発明は、各種材料表面にレーザを照射して、材料表面特性を変化させる表面処理方法を提供することを目的とする。

#### 課題を解決するための手段

本発明の請求項 1 に記載された周期構造作成方法は、材料表面に、一軸でかつ加工閾値近傍のレーザを照射し、その照射部をオーバーラップさせながら走査して、入射光とその材料表面に沿った散乱光の干渉部分のアブレーションによって自己組織的に周期構造を作成することを特徴とするものである。

ここで、レーザは、CO<sub>2</sub>レーザやYAGレーザなどのピコ秒やナノ秒パルスレーザなど、各種のレーザを用いることが可能であるが、例えば、チタンサファイアレーザを利用することができる。チタンサファイアレーザパルスは、例えば、パルス幅 120 fs、中心波長 800 nm、繰り返し周波数 1 kHz、パルスエネルギー 0.25～400 μJ/pulse の超短パルスのフェムト秒レーザである。

本発明の請求項 2 に記載の周期構造作成方法は、前記レーザの走査速度を、レーザスポット径およびレーザ発振周波数に応じて、同一部分におけるレーザ照射回数が 10～300 ショットになるように設定することを特徴とするものである。

本発明の請求項 3 に記載された周期構造作成方法は、前記材料表面へのレーザの入射角を変更して、周期構造の周期ピッチを変更することを特徴とするものである。

本発明の請求項 4 に記載された周期構造作成方法は、レーザが入射角を有し、レーザの走査方向を変更して、周期構造を変更することを特徴とするものである。

本発明の請求項 5 に記載された周期構造作成方法は、前記偏光方向を変化することにより、周期構造の方向を変化することを特徴とするものである。

本発明の請求項 6 に記載された周期構造作成方法は、前記レーザをビームエキスパンダ、またはビームエキスパンダおよびシリンドリカルレンズにより広範囲に形成して照射することを特徴とするものである。

本発明の請求項 7 に記載された表面処理方法は、材料表面に、グレーティング構造を形

成し、材料表面特性を変化させることを特徴とするものである。

本発明の請求項 8 に記載の表面処理方法は、材料表面に、加工閾値近傍のレーザを照射し、その照射部分をオーバーラップさせながら走査して、自己組織的に前記グレーティング構造を形成することを特徴とするものである。

本発明の請求項 9 に記載された表面処理方法は、前記グレーティング構造を、複数方向に重ね合わせて形成することを特徴とするものである。

本発明の請求項 10 に記載された表面処理方法は、前記グレーティング構造を、複数方向に混在させて形成することを特徴とするものである。

本発明の請求項 11 に記載された表面処理方法は、材料表面に、偏光方向が異なる複数パルスの加工閾値近傍のレーザをパルスが時間的に重ならない条件で照射し、その照射部分をオーバーラップさせながら走査して、自己組織的に前記グレーティング構造を複数方向に重ね合わせて形成することを特徴とするものである。

本発明の請求項 12 に記載された表面処理方法は、材料表面に、加工閾値近傍のレーザを照射し、その照射部分をオーバーラップさせながら走査する際、走査中に偏光方向を変化させることにより、自己組織的に前記グレーティング構造を複数方向に混在させて形成することを特徴とするものである。

本発明の請求項 13 に記載された表面処理方法は、シリンドリカルレンズを用いてレーザを集光し、前記グレーティング構造を広範囲に形成することを特徴とするものである。

本発明の請求項 14 に記載された表面処理方法は、前記グレーティング構造の周期ピッチが  $1\mu\text{m}$  以下であることを特徴とするものである。

本発明の請求項 15 に記載された表面処理方法は、前記材料表面特性が、防塵、微粒子付着抑制効果であることを特徴とするものである。

本発明の請求項 16 に記載された表面処理方法は、前記材料表面特性が、摩擦、摩耗低減効果であることを特徴とするものである。

本発明の請求項 17 に記載された表面処理方法は、前記材料表面特性が、濡れ性制御効果であることを特徴とするものである。

## 発 明 の 効 果

本発明の請求項 1 に記載の周期構造作成方法のように、超短パルスレーザ（フェムト秒レーザ）を材料表面に照射すると、CO<sub>2</sub>レーザやYAGレーザのピコ秒やナノ秒パルスレーザを照射する場合に比較して、レーザのパルス幅が小さいので熱伝導が小さく、レーザ照射部分近傍の基板温度上昇はほとんどないので、熱影響による材料特性の劣化が防止できる。また、レーザを照射した部分のみに微細な周期構造を作成できるため、マイクロマシンなどの微細な部品の用途に好適である。

すなわち、レーザ照射時の熱拡散長 $L_D$ は、材料の熱拡散率を $D$ 、レーザのパルス幅を $\tau_1$ とすると、 $L_D = (D \tau_1)^{1/2}$ で表せる。ここで、 $D = k_T / \rho c_p$ で、 $k_T$ 、 $\rho$ 、 $c_p$ は、それぞれ熱伝導率、密度および比熱である。したがって、熱拡散長 $L_D$ は、パルス幅 $\tau_1$ の平方根に比例するため、超短パルスレーザを照射すれば、レーザ照射時の熱拡散長が非常に小さくなり、パルス幅がピコ秒以下になると、熱拡散をほとんど無視することができ、小型の部品加工に有利になる。

レーザが基板表面に照射されると、基板の凹凸によりレーザが散乱され、表面散乱が生じる。直線偏光のレーザを基板に照射すると、 $p$ 偏光成分の入射光 1 とその表面に沿った散乱光の干渉が起こる。入射光のフルエンスが閾値近傍の場合、入射光と表面に沿った散乱光の干渉部分だけがアブレーションされる。一旦、アブレーションが始まり表面粗さが増加すると、次のレーザ照射時には、表面散乱の強度が大きくなり、さらにアブレーションが進むとともに、1 波長入だけ離れた位置でも干渉が起こる。レーザ照射を繰り返すと、次々に自己組織的に波長間隔で周期構造（グレーティング構造）が形成されていく。このようにして、一軸のみのレーザ照射によって、周期構造を作成することができる。したがって、従来の 2 軸レーザを照射するものに比較して、装置が簡単、かつ安価になる。しかも、テーブルが振動しても、周期構造の周期ピッチが変化しないという優れた特長がある上、光軸方向のワークディスタンスの変化に対して許容範囲が広く、曲面に周期構造を形成することが可能である。

本発明の請求項 2 に記載の周期構造作成方法のように、レーザ照射の繰り返しにより、



次々に自己組織的に波長間隔で形成されていく周期構造の凹凸は、数十ショット程度で波長オーダーまで成長するが、300ショット以上レーザを照射すると熱影響により不明瞭となる。そこで、同位置に照射されるショット数の合計が10～300ショットとなるようにオーバーラップさせながら走査させることで、周期構造を広範囲に拡張形成することが可能になる。

本発明の請求項3に記載の周期構造作成方法によれば、レーザの入射角度を変更することによって、入射光と材料表面に沿った散乱光との干渉によるアブレーションが変化して、周期ピッチを変更することができるので、任意の周期ピッチの周期構造を作成することができる。

本発明の請求項4に記載の周期構造作成方法によれば、入射角を有するレーザの走査方向を変更すると、入射光と材料表面に沿った散乱光との干渉によるアブレーションが変化して、周期構造を変更することができるので、同一のレーザ照射条件で走査方向を変更するのみで異なる周期構造を作成することができる。また、レーザの走査方向を変更すると共に、レーザの入射角を変更すれば、より多彩に周期構造を変更することができる。

本発明の請求項5に記載の周期構造作成方法によれば、偏光方向と直交方向に周期構造が形成されることを利用して、偏光方向を変更することによって、周期構造の方向を変更することができる。

上記請求項6に記載の周期構造作成方法によれば、レーザをビームエキスパンダによって広範囲に形成して、あるいは、ビームエキスパンダによって広範囲に形成されたレーザをシリンドリカルレンズにより扁平化して照射することによって、一度に幅広い範囲にレーザ照射が可能になり、広い面積に周期構造を効率的に作成することができる。

本発明の請求項7に記載された表面処理方法によれば、材料表面に、グレーティング構造を形成し、材料表面特性を変化させることができる。

すなわち、材料表面にレーザを照射してグレーティング構造を形成するが、前述と同様に、照射するレーザは、CO<sub>2</sub>レーザやYAGレーザなどのピコ秒やナノ秒パルスレーザなど、各種のレーザを用いることが可能であるが、例えば、チタンサファイアレーザを利用することができる。チタンサファイアレーザパルスは、例えば、パルス幅120fs、中

心波長800nm、繰り返し周波数1kHz、パルスエネルギー0.25~400μJ/pulseの超短パルスのフェムト秒レーザーである。

超短パルスレーザー（フェムト秒レーザー）を材料表面に照射すると、CO<sub>2</sub>レーザーやYAGレーザーのピコ秒やナノ秒パルスレーザーを照射する場合に比較して、レーザーのパルス幅が小さいので熱伝導が小さく、レーザー照射部分近傍の基板温度上昇はほとんどないので、熱影響による材料特性の劣化が防止できる。また、レーザーを照射した部分のみに微細なグレーティング構造を作成できるため、マイクロマシンなどの微細な部品の用途に好適である。

すなわち、レーザー照射時の熱拡散長 $L_D$ は、材料の熱拡散率を $D$ 、レーザーのパルス幅を $\tau_1$ とすると、 $L_D = (D\tau_1)^{1/2}$ で表せる。ここで、 $D = k_T / \rho c_p$ で、 $k_T$ 、 $\rho$ 、 $c_p$ は、それぞれ熱伝導率、密度および比熱である。したがって、熱拡散長 $L_D$ は、パルス幅 $\tau_1$ の平方根に比例するため、超短パルスレーザーを照射すれば、レーザー照射時の熱拡散長が非常に小さくなり、パルス幅がピコ秒以下になると、熱拡散をほとんど無視することができ、小型の部品加工に有利になる。

レーザーが基板表面に照射されると、基板表面の凹凸によりレーザーが散乱され、表面散乱が生じる。直線偏光のレーザーを基板に照射すると、p偏光成分に入射光とその表面に沿った散乱光の干渉が起こる。入射光のフルエンスが閾値近傍の場合、入射光と表面に沿った散乱光の干渉部分だけがアブレーションされる。一旦、アブレーションが始まり表面粗さが増加すると、次のレーザー照射時には、表面散乱の強度が大きくなり、さらにアブレーションが進むとともに、1波長入だけ離れた位置でも干渉が起こる。レーザー照射を繰り返すと、次々に自己組織的に波長間隔で周期的にグレーティング構造が形成されていく。このようにして、一軸のみのレーザー照射によって、グレーティング構造を作成することができる。この材料表面へのグレーティング構造の形成により、塵埃・微粒子付着性、摩擦・摩耗性、濡れ性などの一つまたは二つ以上の材料表面特性が変化させることができる。

本発明の請求項8に記載の表面加工方法によれば、材料表面に、加工閾値近傍のレーザーを照射し、その照射部分をオーバーラップさせながら走査することにより、自己組織的にグレーティング構造が形成される。このグレーティング構造は、レーザーの偏光方向によって、例えば、X方向のグレーティング構造や、Y方向のグレーティング構造などが形成で

きる。なお、レーザ照射により形成される凹凸は、数十ショット程度で波長オーダーまで成長するが、300ショット以上レーザを照射すると熱影響により不明瞭となる。そこで、同位置に照射されるショット数の合計が10～300ショットとなるようにオーバーラップさせながら走査させることで、グレーティング構造を広範囲に拡張形成することが可能になる。

本発明の請求項9に記載の表面処理方法は、レーザの偏光方向を変更することによって、グレーティング構造の方向を変更することができることに基づいて、例えば、加工閾値近傍のレーザを照射し、その照射部分をオーバーラップさせながらレーザをある方向に走査して、一方向のグレーティング構造を形成した後、そのグレーティング構造に重ね合わせて、材料表面とレーザの偏光方向の相対角度を変更して、加工閾値近傍のレーザを照射し、その照射部分をオーバーラップさせながらレーザを走査することによって、グレーティング構造を形成することにより、複数方向に重ね合わせたグレーティング構造を形成することができる。したがって、例えば、先のグレーティング形成時と後のグレーティング形成時における材料表面とレーザの偏光方向の相対角度を $90^\circ$  変更すれば、格子状のグレーティング構造を形成することができるし、先のグレーティング形成時と後のグレーティング形成時における材料表面とレーザの偏光方向の相対角度を $90^\circ$  以外の任意角度で変更すれば、斜格子状のグレーティング構造を形成することができる。

上記請求項10に記載の表面処理方法によれば、前述のように、レーザの偏光方向を変更することによって、グレーティング構造の方向を変更することができることに基づいて、例えば、加工閾値近傍のレーザを照射し、その照射部分をオーバーラップさせながらレーザをある方向に走査して、一方向のグレーティング構造を連続的または間隔をあけて形成した後、そのグレーティング構造に隣接して、または離隔させて、材料表面とレーザの偏光方向の相対角度を変更して、加工閾値近傍のレーザを照射し、その照射部分をオーバーラップさせながらレーザを走査することによって、先に形成した一方向のグレーティング構造に隣接して、または離隔して異なる方向にグレーティング構造を形成することができる。したがって、先のグレーティング形成時と後のグレーティング形成時における材料表面とレーザの偏光方向の相対角度を $90^\circ$  変更すれば、X方向のグレーティング構造とY

方向のグレーティング構造とを混在させて形成することができるし、先のグレーティング形成時と後のグレーティング形成時における材料表面とレーザーの偏光方向の相対角度を  $90^\circ$  以外の任意角度で変更すれば、向きが異なったグレーティング構造を混在させて形成することができる。

上記請求項 1 1 に記載の表面処理方法によれば、レーザー発生装置で発生したレーザーを、ハーフミラーで 2 つのレーザーに分離し、一方のレーザーに光学遅延を形成する。双方のレーザーを偏光装置によって所定方向に偏光させて、ハーフミラーに供給し、このハーフミラーで所定方向に偏光された双方のレーザーを重ね合わせて、材料表面に照射することで、偏光方向が異なる複数パルスの加工閾値近傍のレーザーを、材料表面に所定の時間間隔で照射することができる。そして、その照射部分をオーバーラップさせながら走査することによって、自己組織的に複数方向に重ね合わされたグレーティング構造を一度に形成することができる。したがって、例えば、偏光方向が  $90^\circ$  異なる複数パルスの加工閾値近傍のレーザーを所定の時間間隔で照射し、その照射部分をオーバーラップさせながら走査することによって、自己組織的に X 方向のグレーティング構造と方向が  $90^\circ$  異なる Y 方向のグレーティング構造とを重ね合わせた格子状のグレーティング構造を一度に形成することができる。偏光方向が  $90^\circ$  以外の任意角度異なる複数パルスの加工閾値近傍のレーザーを所定の時間間隔で照射し、その照射部分をオーバーラップさせながら走査することによって、自己組織的に  $90^\circ$  以外の任意角度で交差する斜格子状のグレーティング構造を形成することができる。

上記請求項 1 2 に記載の表面処理方法によれば、前述のように、レーザーの偏光方向を変更することによって、グレーティング構造の方向を変更することができることに基づいて、例えば、加工閾値近傍のレーザーを照射し、その照射部分をオーバーラップさせながらレーザーを走査して、グレーティング構造を所定の長さ形成した後、レーザーの照射を継続しながら、そのグレーティング構造に隣接して、または離隔させて、レーザーの偏光方向を変更して、加工閾値近傍のレーザーを照射し、その照射部分をオーバーラップさせながらレーザーを走査することによって、先に形成したグレーティング構造に隣接して、または離隔して方向の異なるグレーティング構造を形成することができる。したがって、先の偏光方向と後

の偏光方向とを  $90^\circ$  変更すれば、縦方向のグレーティング構造と横方向のグレーティング構造とを混在させて形成することができるし、レーザ走査中に偏光方向を任意の回数  $90^\circ$  以外の任意角度で変更すれば、任意の方向のグレーティング構造を任意の数、混在させて形成することができる。

上記請求項 13 に記載の表面処理方法によれば、レーザビームをビームエキスパンダによって大径のレーザビームに拡大し、この大径のレーザビームをシリンドリカルレンズによって集光すると、幅狭状で長い線状レーザが得られるので、この線状レーザを材料表面に照射し、その照射部分をオーバーラップさせながら走査して、自己組織的に前記グレーティング構造を広範囲に形成することができる。したがって、大面積のグレーティング構造を短時間で形成することができる。

上記請求項 14 に記載の表面処理方法によれば、従来の機械加工によっては得られなかった周期ピッチが  $1\mu\text{m}$  以下の微細なグレーティング構造が簡単に得られるので、マイクロマシンなどの微細な部品表面は元より、通常の部品表面にも微細なグレーティング構造を形成して、その材料表面特性を変化させることができる。

上記請求項 15 に記載の表面処理方法によれば、グレーティング構造により大気中の水分が凝縮した水の表面張力に起因する引き離し力が低減されることによって、その最外表面に付着する塵埃、微粒子の付着力が低減され、材料表面の防塵、微粒子付着抑制効果が得られる。

上記請求項 16 に載の表面処理方法によれば、潤滑剤を用いない乾燥摩擦においては、グレーティング構造により引き離し力が低減されることによって、その最外表面と摺接する他の材料表面に作用する力が低減され、材料表面の摩擦、摩耗低減効果が得られる。また、潤滑剤を用いる場合は、グレーティング構造が潤滑剤の保持および補給機能を持つこと、及び流体膜の負荷能力を生じること、磨耗粉のかみ込み防止機能を持つことにより、材料表面の摩擦、摩耗低減効果が得られる。

上記請求項 17 に記載の表面処理方法によれば、グレーティング構造により材料の見かけの面積と実表面積の比が大きくなり、見かけの表面エネルギーが変化することで、濡れ性制御効果が得られる。

## 図面の簡単な説明

図1は本発明の実施形態の周期構造作成方法について説明する概略斜視図である。

図2は本発明の実施形態の周期構造作成に用いる装置の概略構成図である。

図3(a)は本発明の実施形態の周期構造作成方法によってSi表面にレーザを偏光方向と平行方向に3スキャン走査して形成した周期構造の平面図である。

図3(b)は図3(a)の周期構造の拡大詳細図である。

図4(a)は本発明の実施形態の周期構造作成方法によりSi表面にレーザを偏光方向と直交方向に3スキャン走査して形成した周期構造の平面図である。

図4(b)は図4(a)の周期構造の拡大詳細図である。

図5は本発明の実施形態の周期構造作成方法によりレーザフルエンスを加工閾値ぎりぎりにしてSi表面に形成した周期構造の平面図である。

図6は本発明の実施形態の周期構造作成方法によりSi表面にシリンドリカルレンズを用いて形成した周期構造の拡大詳細図である。

図7は本発明の実施形態の周期構造作成方法によりCuテープ表面にシリンドリカルレンズを用いて形成した周期構造の平面図である。

図8(a)は本発明の周期構造作成方法によりAlテープ表面に形成した周期構造の拡大詳細図である。

図8(b)は本発明の周期構造作成方法によりAl箔表面に形成した周期構造の拡大詳細図である。

図9(a)は入射光と散乱光とのs-タイプ干渉の生成理由の説明図である。

図9(b)は入射光と散乱光とのs+タイプ干渉の生成理由の説明図である。

図10は入射光が角度を有する場合の試料の送り方向の定義図である。

図11はCuテープを送り方向Lに走査した場合における周期構造で、

図11(a)はs-タイプの周期構造の拡大詳細図である。

図11(b)はs+タイプの周期構造の拡大詳細図である。

図12はCuテープを送り方向Rに走査した場合における周期構造で、

図12(a)はs-タイプの周期構造の拡大詳細図である。

図12(b)はs+タイプの周期構造の拡大詳細図である。

図13はSi, Cuの周期構造における周期ピッチの入射角依存性について示す特性図である。

図14(a)は送り方向Lの場合における周期構造の形成メカニズムについて説明する模式図である。

図14(b)は送り方向Rの場合における周期構造の形成メカニズムについて説明する模式図である。

図15(a)はX方向の周期構造の拡大斜視図である。

図15(b)はY方向の周期構造の拡大斜視図である。

図15(c)はX方向の周期構造とY方向の周期構造とを重ね合わせて形成した複合型周期構造の斜視図である。

図15(d)はX方向の周期構造とY方向の周期構造とを混在させて形成した周期構造の斜視図である。

図16は一方向の周期構造と他方向の周期構造とを一工程で形成する周期構造形成装置の構成図である。

図17は回転摺動試験装置の概略構成図である。

図18は摺動部品の摺動面に種々の形態で周期構造を形成した状態の模式的平面図で、

図18(a)は放射状の周期構造である。

図18(b)は同心円状の周期構造である。

図18(c)はスパイラル型1の周期構造である。

図18(d)はスパイラル型2の周期構造である。

図19は回転摺動試験における摺動速度の変化特性図である。

図20は各種摺動面構造の摺動試験結果における摺動速度と摩擦係数の特性図で、

図20(a)は鏡面どうしを摺動させた場合である。

図20(b)は放射状周期構造と鏡面を摺動させた場合である。

- 図20(c)は同心円状周期構造と鏡面を摺動させた場合である。
- 図20(d)はスパイラル型1の周期構造と鏡面を摺動させた場合である。
- 図21は荷重摺動試験後の摩耗痕が形成された部分の周期構造面の状態で、
- 図21(a)は放射状周期構造の場合である。
- 図21(b)は同心円状周期構造の場合である。
- 図22は荷重摺動試験後の摩耗痕の生じていない部分の周期構造面の状態で、
- 図22(a)は放射状周期構造の場合である。
- 図22(b)は同心円状周期構造の場合である。
- 図23はディスク／ディスクによる摺動速度と摩擦係数の特性図で、
- 図23(a)は同心円状周期構造の場合である。
- 図23(b)は放射状周期構造の場合である。
- 図23(c)はスパイラル型1の周期構造の場合である。

#### 発明を実施するための最良の形態

以下、本発明の実施の原理について、図面を参照して説明する。図1は本発明の周期構造作成方法および表面加工方法における周期構造形成メカニズムについて説明する概略斜視図と、周期構造の作成過程のブロック図とを示す。図1の概略斜視図において、レーザー1を試料2の表面に照射すると、入射光のp偏光成分3と、表面散乱光のp偏光成分5との干渉が起こり定在波7が生じる。なお、4は入射光のs偏光成分、6は表面散乱光のs偏光成分である。

入射光のフルエンスがレーザーの閾値近傍の場合、入射光のp偏光成分3と表面に沿った散乱光のp偏光成分5の干渉部分だけがアブレーションされる(12)。一旦アブレーションが始まり表面粗さが増加すると、次のレーザー照射時には表面散乱光の強度が増加し(13)、さらにアブレーションが進むとともに、1波長入離れた位置でも干渉が起こる。入射光が直線偏光の場合、レーザー照射を繰り返すと、それによって入射光の波長入間隔で干渉が生じることにより(14)、周期構造が自己組織化により作成される(15)。



この周期構造の凹凸は、10～300ショットで波長オーダーまで成長するが、300ショット以上レーザを照射すると、凹凸が不明瞭になることが確認された。したがって、同一位置に照射されるショット数が10～300ショットとなるように、レーザをオーバーラップさせながら走査させることで、周期構造を試料表面の広範囲に拡張することが可能になる。なお、レーザの走査は、試料2を支持するテーブルを移動させてもよいし、レーザ側を走査してもよい。

図2は周期構造作成装置20の模式図を示す。なお、以下の説明において、具体的数値は理解を助けるために、あくまでも一例として記載したものであり、特に限定するものではないことを、予め断っておく。チタンサファイアレーザ発生装置21で発生したチタンサファイアレーザ1（パルス幅： $120\text{ fs}$ 、中心波長 $\lambda$ ： $800\text{ nm}$ 、繰り返し周波数： $1\text{ kHz}$ 、パルスエネルギー $E$ ： $0.25\sim400\text{ }\mu\text{J/pulse}$ ）は、 $1/2$ 波長板22と偏光ビームスプリッタ23を用いてパルスエネルギーを調整可能にした上で、レンズ（焦点距離： $f=100\text{ mm}$ ）24を通して、 $X-Y-\theta$ ステージ25上の試料2の表面に照射した。 $X-Y-\theta$ ステージ25の分解能は任意でよいが、例えば、 $2\text{ }\mu\text{m}$ のものを用いた。レーザ1が試料2上でオーバーラップしながら照射されるように、 $X-Y-\theta$ ステージ25により $0.25\text{ mm/s}$ （ $125\text{ pps}$ ）の速度で試料2を移動させて、入射光と表面に沿った散乱光との干渉によるアブレーションを行ない、連続的に周期構造を作成した。

試料2の走査速度は、レーザ1のスポット径とレーザ1の強度に応じて設定する。レーザ1の試料2への入射角 $\theta$ は、 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$  および  $45^\circ$  とした。試料2として、いずれも厚さ寸法が $50\text{ }\mu\text{m}$ のSi、CuテープおよびAlテープ、さらに厚さ $15\text{ }\mu\text{m}$ のAl箔を用いた。このようにして得られた周期構造の観測には、レーザ顕微鏡および原子間顕微鏡（AFM）を使用した。

#### [Siの周期構造（入射角 $0^\circ$ ）]

$f=100\text{ mm}$ の平凸レンズ24により試料2としてのSi基板の表面に、加工閾値近傍のレーザ1を3スキャンして、周期構造を作成した。レーザ1の走査方向と偏光方向が平行な場合の周期構造を、図3（a）、図3（b）に示す。また、偏光方向を $90^\circ$ 回転

させた場合の周期構造を、図4(a)、図4(b)に示す。図3(a)、図4(a)が全体の様子を示し、図3(b)、図4(b)が作成された周期構造を拡大した詳細を示す。図3(a)、図4(a)において、それぞれ3スキャンしているのが理解し易いように、2スキャン目は途中でレーザ照射を停止している。これらの周期構造は、すべて偏光方向に直交して形成されている。周期構造の周期ピッチはレーザ波長 $\lambda$ (800nm)よりやや短く、700nm前後となった。各スキャンのオーバーラップ部も大きな乱れは見受けられない。

さらに、レーザフルエンスを加工閾値ぎりぎりまで低下させ、極力アブレーションを抑えた場合の周期構造を、図5に示す。周期構造の周期ピッチは795nmであり、レーザの波長 $\lambda$ (中心波長800nm)とよく一致している。

より広い範囲に周期構造を形成するため、ビームエキスパンダを用いてレーザを拡大し、さらに、 $f=100\text{mm}$ のシリンダリカルレンズを用いて周期構造を形成したところ、周期構造が幅2mm以上にわたって1スキャン形成された。この周期構造を図6に示す。周期ピッチは700nmであり、平凸レンズにより加工閾値近傍で形成された周期構造{図3(b)}と大差ないものが得られた。

シリンダリカルレンズにより得られた周期構造に白色光を照射すると、分光能力が認められ、広い範囲に一定間隔の周期構造が得られていることが確認された。

#### [Cuテープの周期構造(入射角 $0^\circ$ )]

$f=100\text{mm}$ のシリンダリカルレンズを用いてCuテープに周期構造を形成したところ、Siと同様に周期構造が幅2mm以上にわたって1スキャンで形成された。ただし、Cuテープの場合は、ワークディスタンスを焦点距離より1mm短い99mmとしたときに、比較的良好な周期構造が得られた。また、Siの場合( $E=100\mu\text{J}/\text{pulse}$ )と比較すると、3倍強のパルスエネルギー( $E=400\mu\text{J}/\text{pulse}$ )が必要であった。図7はCuテープに形成された周期構造を示し、周期構造の周期ピッチは約700nmで、Siの場合とほとんど差異は認められない。シリンダリカルレンズにより得られた上記の周期構造に白色光を照射すると、Siと同様に、分光能力が認められた。

#### [AlテープおよびAl箔の周期構造(入射角 $0^\circ$ )]

ビームエキスパンダおよび  $f = 100 \text{ mm}$  のシリンドリカルレンズを用いて Al テープおよび Al 箔に周期構造を形成したところ、それぞれ図 8 (a) および図 8 (b) に示す周期構造が得られた。Al テープおよび Al 箔の周期構造の周期ピッチは  $600 \text{ nm}$  であった。また、双方の周期構造に白色光を照射して分光能力について調べた結果、分光能力が認められた。さらに、厚さ  $15 \mu\text{m}$  の Al 箔においても裏面に全く熱影響は認められなかった。

#### [周期構造の入射角および走査方向依存性]

波長  $\lambda$  のレーザ 1 が入射角  $\theta$  で試料 2 に照射された場合、図 9 (a) , 図 9 (b) に示すような、2 種類の干渉が生じる。以後、これらの干渉を区別して、図 9 (a) のような周期が広い干渉を s-タイプの干渉と称し、図 9 (b) のような周期が狭い干渉を s+タイプの干渉と称する。それぞれの周期を  $X_{s-}$  ,  $X_{s+}$  とすると、図 9 (a) の場合の周期  $X_{s-}$  は、次の式 1 で与えられる。

#### 【式 1】

$$X_{s-} = \frac{\lambda}{1 - \sin \theta}$$

また、図 9 (b) の場合の周期  $X_{s+}$  は、次の式 2 で与えられる。

#### 【式 2】

$$X_{s+} = \frac{\lambda}{1 + \sin \theta}$$

ビームエキスパンダおよびシリンドリカルレンズを用いて、入射角  $\theta = 15^\circ$  ,  $30^\circ$  ,  $45^\circ$  でレーザ 1 を試料 2 に照射したところ、Si および Cu テープでは、異なる周期を持つ周期構造が重なって現われた。特に、図 10 に示す送り方向 L の場合、周期の広い s-タイプ、周期の狭い s+タイプともコントラストよく形成された。一方、送り方向 R の場合には、送り方向 L の場合と比較すると、s-タイプの形成が未発達であった。

Cu テープに入射角  $45^\circ$  、送り方向 L で形成した周期構造を図 11 (a) , 図 11 (b) に示す。図 11 (a) , 図 11 (b) は同一個所においてピント位置を変化させて撮影したもので、同位置に s-タイプと s+タイプの周期構造が形成されているため、この送り方向 L では、比較的 s-タイプの周期構造が明瞭に形成されており、s+タイプの周

期構造の観察時にも、s-タイプの周期構造がうっすらと確認できる。

Cuテープに入射角 $45^\circ$ 、送り方向Rで形成した周期構造を図12(a)、図12(b)に示す。この送り方向Rでも、2タイプの周期構造が形成されるが、s-タイプの周期構造は途切れ勝ちになり、s+タイプの周期構造の観察時には、s-タイプの周期構造がほとんど分からず、s-タイプの周期構造は、送り方向Lの場合の方が形成され易いことが分かる。

Si, Cuテープにおける周期構造の周期と入射角の関係を、理論値とともに図13に示す。

送り方向Lの場合に、周期ピッチの大きなs-タイプの周期構造が現われ易い原因は、次のように考えられる。すなわち、送り方向Lの場合、図14(a)に示すように、s-タイプの周期構造31がまず平滑面に形成され、試料2が送られるとともに、s+タイプの周期構造32が重なって形成されていくのに対して、送り方向Rの場合は、図14(b)に示すように、先に周期ピッチの狭いs+タイプの周期構造32が平滑面に形成されるために、s-タイプの周期構造が現われ難くなる。

以上のように、Si, CuテープおよびAlテープに対して、直線偏光のフェムト秒レーザーの照射により、加工閾値近傍のフルエンスで微細周期構造の作成を行なった結果、以下のことが確認された。

(1) Si, Cu, Alはシリンドリカルレンズを用いて試料表面に一軸レーザーを照射および走査することにより、広範囲に周期構造を作成することができる。

(2) 周期構造は、入射角依存性を持ち、その周期の理論値は $\lambda / (1 \pm \sin \theta)$ となる。

(3) 周期構造は、走査方向依存性を持ち、送り方向Lのとき、s-タイプの周期構造が現われ易い。

(4) 周期構造は、同じメカニズムで形成されており、入射光と表面散乱光の干渉によって形成される。

なお、上記のSi, CuテープおよびAlテープ以外の試料についても、上記Si, CuテープおよびAlテープと同様に周期構造の作成が可能であった。

次に、本発明の材料表面処理方法について説明する。

前述のように、本発明によれば、材料表面にレーザを照射し、その照射光を走査することによって、周期構造が形成されるが、レーザの偏光方向をY方向にすれば、図15(a)に示すように、X方向の周期構造 $8_x$ を形成することができるし、レーザの偏光方向をX方向にすれば、図15(b)に示すように、Y方向の周期構造 $8_y$ を形成することができる。

また、前述のように、レーザの偏光方向を変更することによって、周期構造の方向を変更することができることに基づいて、例えば、加工閾値近傍のレーザを照射し、その照射部分をオーバーラップさせながらレーザをある方向に走査して、図15(a)に示すように、一方向の周期構造 $8_x$ を形成した後、その周期構造 $8_x$ に重ね合わせて、材料表面と偏光方向の相対角度を変更して、加工閾値近傍のレーザを照射し、その照射部分をオーバーラップさせながらレーザを走査することによって、異なる方向の周期構造 $8_y$ を形成することにより、複数方向に重ね合わせたグレーティング構造 $8_z$ を形成することができる。

したがって、例えば、図15(c)に示すように、先の周期形成時と後の周期構造形成時における材料表面とレーザの偏光方向の相対角度を $90^\circ$ に変更すれば、格子状の周期構造 $8_z$ を形成することができるし、先の周期構造形成時と後の周期構造形成時における材料表面とレーザの偏光方向の相対角度を $90^\circ$ 以外の任意角度で変更すれば、斜格子状の周期構造を形成することができる。

また、例えば、図15(d)に示すように、加工閾値近傍のレーザを照射し、その照射部分をオーバーラップさせながらレーザをある方向に走査して、一方向の周期構造 $8_x$ を形成した後、その周期構造 $8_x$ に隣接して、または離隔させて、材料表面とレーザの偏光方向の相対角度を変更して、加工閾値近傍のレーザを照射し、その照射部分をオーバーラップさせながらレーザを走査することによって、先に形成した一方向の周期構造 $8_x$ に隣接して、または離隔して異なる方向に周期構造 $8_y$ を形成することができる。したがって、先の周期構造形成時と後の周期構造形成時における材料表面とレーザの偏光方向の相対角度を $90^\circ$ に変更すれば、X方向の周期構造 $8_x$ とY方向の周期構造 $8_y$ とを混在させて形成することができるし、先の周期構造形成時と後の周期構造形成時における材料表面とレーザの偏

光方向の相対角度を  $90^\circ$  以外の任意角度で変更すれば、向きが異なった周期構造を混在させて形成することができる。

また、前述のように、レーザの偏光方向を変更することによって、周期構造の方向を変更することができることに基ついて、図 16 に示すレーザ照射装置 40 を用いて、図 15 (c) に示すような、複数方向に重ね合わされたグレーティング構造を一工程で形成することができる。図 16 の周期構造形成装置 40 は、チタンサファイアレーザ発生装置 41 で発生したレーザ  $L_0$  を、ミラー 42 で全反射させ、ハーフミラー 43 で反射レーザ  $L_1$  と透過レーザ  $L_2$  とに分離し、反射レーザ  $L_1$  をミラー 44, 45 で全反射させ、透過レーザ  $L_2$  に光学遅延 46 を形成する。この光学遅延 46 は、ミラー 47, 48 を有する。双方のレーザ  $L_1$ ,  $L_2$  を偏光装置 49, 50 によって所定方向に偏光させたレーザ  $L_3$ ,  $L_4$  を、ハーフミラー 51 に供給し、このハーフミラー 51 で前記の偏光されたレーザ  $L_3$ ,  $L_4$  を重ね合わせて、レンズ 52 を通して X-Y テーブル 53 に搭載された材料 54 の表面に照射することで、偏光方向が異なる複数パルスの加工閾値近傍のレーザ  $L_3$ ,  $L_4$  を、材料 54 の表面に所定の時間間隔で照射することができる。そして、その照射部分をオーバーラップさせながら走査することによって、自己組織的に、図 15 (c) に示すような、複数方向に重ね合わされた周期構造  $8_z$  を一度に形成することができる。

したがって、例えば、偏光方向が  $90^\circ$  異なる複数パルスの加工閾値近傍のレーザ  $L_3$  と  $L_4$  とを所定の時間間隔で照射し、その照射部分をオーバーラップさせながら走査することによって、自己組織的に図 15 (c) に示すような、X 方向の周期構造  $8_x$  と  $90^\circ$  異なる Y 方向の周期構造  $8_y$  とを重ね合わせた格子状の周期構造  $8_z$  を一工程で形成することができる。また、偏光方向が  $90^\circ$  以外の任意角度異なる複数パルスの加工閾値近傍のレーザを所定の時間間隔で照射し、その照射部分をオーバーラップさせながら走査することによって、自己組織的に  $90^\circ$  以外の任意角度で交差する斜格子状の周期構造を形成することができる。

次に、上記の周期構造形成による材料表面特性の変化について説明する。表面特性を変化させる材料として、厚さ寸法が  $50\mu\text{m}$  の Si を用いた。また、照射レーザとして、超短パルスのチタンサファイアレーザ、例えば、パルス幅  $120\text{fs}$ 、中心波長  $800\text{nm}$ 、

繰り返し周波数1kHz、パルスエネルギー $100\mu\text{J}/\text{pulse}$ を、レーザエキスパンダで拡大し、さらにシリンドリカルレンズによって集光して、前記Si表面に照射し、その照射部分をオーバーラップさせながら走査速度 $0.25\text{mm}/\text{s}$ で走査した。その結果、周期が $0.7\mu\text{m}$ で、深さが $0.2\mu\text{m}$ の周期構造が形成された。

上記の周期構造が形成されたSi表面の微粒子(直径 $20\mu\text{m}$ のガラス粉)付着特性を、鏡面状のSiの微粒子付着特性とを比較すると、表1の結果が得られた。

【表1】

微粒子付着抑制効果

	本発明	鏡面
面 積	$115\text{mm}^2$	$68.5\text{mm}^2$
微粒子付着数	0個	260個
付 着 密 度	$0/\text{mm}^2$	$3.8/\text{mm}^2$

上記表1に示すように、周期構造によって、Si表面の微粒子付着抑制効果が得られることから、引き離し力が低減していることが明らかである。マイクロマシンでは、自身の重量が小さいために、引き離し力が摩擦力に支配的な影響を及ぼす。本発明により周期構造を形成することで、引き離し力を低減できるため、マイクロマシンの摩擦力を低減することが可能となる。また、摩擦力の低減により、摩耗を低減することが可能となる。

なお、本発明は、マイクロマシンに限らず、精密な自動車用エンジンのクランクシャフト、ピストンリングなどに適用すると、周期構造が潤滑剤の保持および補給機能を持つこと、および流体膜の負荷能力を生じること、磨耗粉のかみ込み防止機能を持つことにより、材料表面の摩擦、摩耗低減効果が得られる。

#### (実施例)

次に本発明の周期構造形成による摺動特性に及ぼす影響について説明する。

図17は、上記の各種周期構造を形成したディスク状試験片の摺動試験に用いた摺動試験装置60の概略構成図を示す。この摺動試験装置60は、基台61に軸受62を介して試験片支持部材63を回転自在に支持し、この試験片支持部材63の凹部に静止側試験片64を支持している。また、基台61に支柱65を立設し、この支柱65にロードセル6

6を配置し、このロードセル66にカンチレバー67を介して、前記試験片支持部材63の回転トルクが掛かるようになっている。さらに、前記静止側試験片64に対して、回転側試験片68が配置され、試験片支持部材63の凹部には純水69が収容されて、静止側試験片64と回転側試験片68との摺動面に、純水69が介在されるようにしている。回転側試験片68に荷重70が負荷され、回転駆動源（図示省略）によって回転動作71が可能になっている。

超硬合金よりなるディスク状の試験片に対して、図18(a)～図18(d)の種々のリング状の周期構造を形成した。図18(a)は放射状の周期構造、図18(b)は同心円状の周期構造、図18(c)は第1スパイラル状の周期構造、図18(d)は第2スパイラル状の周期構造である。なお、図18(c)の第1スパイラル状の周期構造と、図18(d)第2のスパイラル状の周期構造とは、スパイラルの方向(角度)が異なっている。

回転側試験片68には、SUS440Cの焼き入れ材、静止側試験片64には、超硬合金を使用した。各試験片の表面粗さは $R_{max} 0.05 \mu m$ 以下、オブチカルフラットによる平坦度が赤色LEDで1バンド以下のものを使用した。静止側試験片64には、内径9.75mm、外径16.25mmのリング状の領域に、前述の4種類の周期構造を形成した。溝深さは約 $0.2 \mu m$ 、スパイラルの溝角度は半径に対して $45^\circ$ とした。

一方、回転側試験片68は、上記精度で鏡面仕上げされた内径10mm、外径16mmのリング状のもの、および外径16mmのディスク形状のものを使用して、リング/ディスク試験と、スラスト軸受を想定したディスク/ディスク試験を行なった。なお、比較のため、鏡面試験片どうしでの試験も行なった。いずれの試験も、室温 $23^\circ C$ に保たれたクリーンブース(クラス100相当)内で行い、各試験片は試験前にエタノールおよび純水による超音波洗浄を行なった。

荷重は10Nで一定とし、摺動速度を $1.2 m/s$ から $0.15 m/s$ まで1分ごとに段階的に減速させた。図19は回転側試験片68における摺動速度変化パターンを示す。ただし、摺動速度は、リング状周期構造およびリング/ディスク試験で使用した回転側試験片68の平均直径13mmの位置での値である。このように、図17の摺動試験装置60において、回転側試験片68の摺動速度(回転速度)を時間経過とともに低減していく



ことによって、静止側試験片 6 4 と回転側試験片 6 8 との摩擦係数の変化をより把握し易いように考慮している。

試験後、摺動トルクから摩擦係数 $\mu$ を次の式 3 で算出した。

【式 3】

$$\mu = \frac{M}{Wr}$$

ここで、Mは摺動トルク、Wは荷重である。また、rはリング状周期構造およびリング／ディスク試験で使用した回転試験片 6 8 の平均半径である 6.5 mmとした。ディスク／ディスク試験において $r = 6.5 \text{ mm}$ として式 2 を適用すると物理的な意味を失うが、リング／ディスク試験の結果と比較して、回転試験片 6 8 の中央部分の影響が分かり易いように、敢えて $r = 6.5 \text{ mm}$ として摩擦係数を算出した。

〔試験結果〕

(リング／ディスク試験)

図 2 0 (a) は鏡面、図 2 0 (b) は放射状周期構造、図 2 0 (c) は同心円状周期構造、図 2 0 (d) は第 1 スパイラルの周期構造を形成した静止側片を用いた場合の試験結果を示す。

図 2 0 (a) の鏡面の試験片の場合は、摺動開始直後から摩擦係数は急激に上昇した。図 2 0 (b) の放射状周期構造を形成した試験片を摺動させた場合は、鏡面の試験片と比較して大幅に摩擦係数が減少した。図 2 0 (c) の同心円状周期構造を形成した試験片を摺動させた場合は、明確な流体潤滑領域は見られない。図 2 0 (d) の第 1 スパイラルの周期構造を形成した試験片を摺動させた場合は、流体潤滑領域の範囲、混合潤滑時の馴染みの早さという観点からは、放射状周期構造の場合と同心円状周期構造の場合との中間の特性が見られる。なお、第 2 スパイラルの周期構造を形成した試験片を摺動させた場合は、摺動により純水を中心部から外周部へ排出するポンプ機能を持っているため、内径部分から純水がすべて排出された時点で、摩擦係数が 0.5 以上に急増した。

の摩耗粉排出能力を確認するため、荷重を通常試験時の 10 倍となる 100 N として摺動を行い、周期構造上に摩耗痕を形成し、その様子を観察した。図 2 1 (a) は放射状周期構造、図 2 1 (b) は同心円状周期構造の様子を示す。放射状周期構造では、摩耗粉に埋

めつくされているのに対し、同心円状周期構造では、鱗片状の摩耗粒子が周期構造上に形成されてはいるが、溝部は摩耗粉に埋め尽くされることなく残存している。

図22(a)および図22(b)は、図21(a)および図21(b)と同じ試験片において摩耗痕の生じていない部分の周期構造の様子を示す。図22(a)の放射状周期構造の場合は、あまり摩耗粉は観察されないが、図22(b)の同心円状周期構造の場合は、100nm程度の摩耗粉が多数付着している。このことから、放射状周期構造では、摩耗痕が発生した部分からほとんど摩耗粉は移動していないが、同心円状周期構造の場合は、摩耗粉は溝部により流体とともに排出されていることが分かる。

(ディスク／ディスク試験)

図23(a)は同心円状周期構造、図23(b)は放射状周期構造、図23(c)は第1スパイラルの周期構造の試験片における摩擦係数の変化を示す。各試験片の中央部分は鏡面どうしの摺動となるが、特に負荷能力を生じない同心円状の周期構造では、鏡面どうしの滑り摩擦が容易に発生するため、最も大きな摩擦係数を示した。

以上の周期構造を形成した試験結果から、次の結論が得られた。

(1) フェムト秒レーザにより自己組織的に形成されるサブミクロンの間隔と溝深さを持つ周期構造は、摩擦係数を大きく低減する機能がある。

(2) 放射状の周期構造は、流体潤滑膜の付加能力を向上される機能を持ち、リング／ディスクの摺動試験では、最も広い条件範囲で流体潤滑領域を示す。

(3) 同心円状周期構造は、摩耗粉の排出能力が大きく、摩耗粉の噛み込みが抑制されるため、リング／ディスクの摺動試験における混合潤滑領域では、最も低い摩擦係数が得られる。

(4) スパイラル状周期構造も流体潤滑膜の負荷能力を向上させる機能を持ち、ディスク／ディスクの摺動試験では、最も広い条件範囲で流体潤滑領域を示す。

## 請 求 の 範 囲

1. 材料表面に、一軸でかつ加工閾値近傍のレーザを照射し、その照射部をオーバーラップさせながら走査して、入射光とその材料表面に沿った散乱光の干渉部分のアブレーションによって自己組織的に周期構造を作成することを特徴とする周期構造作成方法。
2. 前記レーザの走査速度を、レーザスポット径およびレーザ発振周波数に応じて、同一部分におけるレーザ照射回数が10～300ショットになるように設定することを特徴とする請求項1に記載の周期構造作成方法。
3. 前記材料表面へのレーザの入射角を変更して、周期構造の周期ピッチを変更することを特徴とする請求項1または2に記載の周期構造作成方法。
4. 前記レーザが入射角を有し、レーザの走査方向を変更して、周期構造を変更することを特徴とする請求項1から3のいずれかに記載の周期構造作成方法。
5. 前記偏光方向を変化することにより、周期構造の方向を変化することを特徴とする請求項1から4のいずれかに記載の周期構造作成方法。
6. 前記レーザをビームエキスパンダ、またはビームエキスパンダおよびシリンドリカルレンズにより広範囲に形成して照射することを特徴とする請求項1から5のいずれかに記載の周期構造作成方法。
7. 材料表面に、グレーティング構造を形成し、材料表面特性を変化させることを特徴とする表面処理方法。
8. 材料表面に、加工閾値近傍のレーザを照射し、その照射部分をオーバーラップさせながら走査して、自己組織的に前記グレーティング構造を形成することを特徴とする請求項7に記載の表面処理方法。
9. 前記グレーティング構造を、複数方向に重ね合わせて形成することを特徴とする請求項7または8に記載の表面処理方法。
10. 前記グレーティング構造を、複数方向に混在させて形成することを特徴とする請求項7または8に記載の表面処理方法。
11. 材料表面に、偏光方向が異なる複数パルスの加工閾値近傍のレーザをパルスが時間

的に重ならない条件で照射し、その照射部分をオーバーラップさせながら走査して、自己組織的に前記グレーティング構造を複数方向に重ね合わせて形成することを特徴とする請求項 7 から 9 のいずれかに記載の表面処理方法。

12. 材料表面に、加工閾値近傍のレーザを照射し、その照射部分をオーバーラップさせながら走査する際、走査中に偏光方向を変化させることにより、自己組織的に前記グレーティング構造を複数方向に混在させて形成することを特徴とする請求項 7 または 8、または 10 のいずれかに記載の表面処理方法。

13. シリンドリカルレンズを用いてレーザを集光し、前記グレーティング構造を広範囲に形成することを特徴とする請求項 7 から 12 のいずれかに記載の表面処理方法。

14. 前記グレーティング構造の周期ピッチが  $1\text{ }\mu\text{m}$  以下であることを特徴とする請求項 7 から 13 のいずれかに記載の表面処理方法。

15. 前記材料表面特性が、防塵、微粒子付着抑制効果であることを特徴とする請求項 7 から 14 のいずれかに記載の表面処理方法。

16. 前記材料表面特性が、摩擦、摩耗低減効果であることを特徴とする請求項 7 から 14 のいずれかに記載の表面処理方法。

17. 前記材料表面特性が、濡れ性制御効果であることを特徴とする請求項 7 から 14 のいずれかに記載の表面処理方法。

Fig. 1

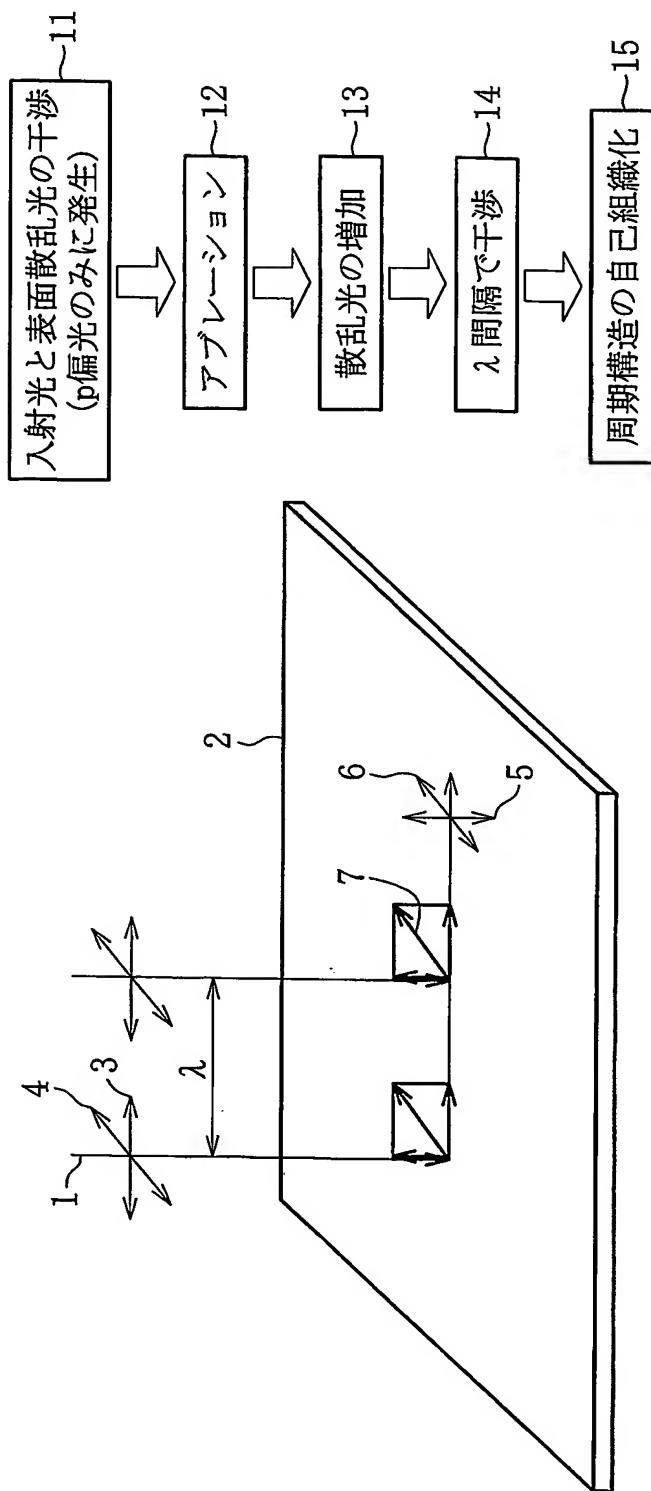
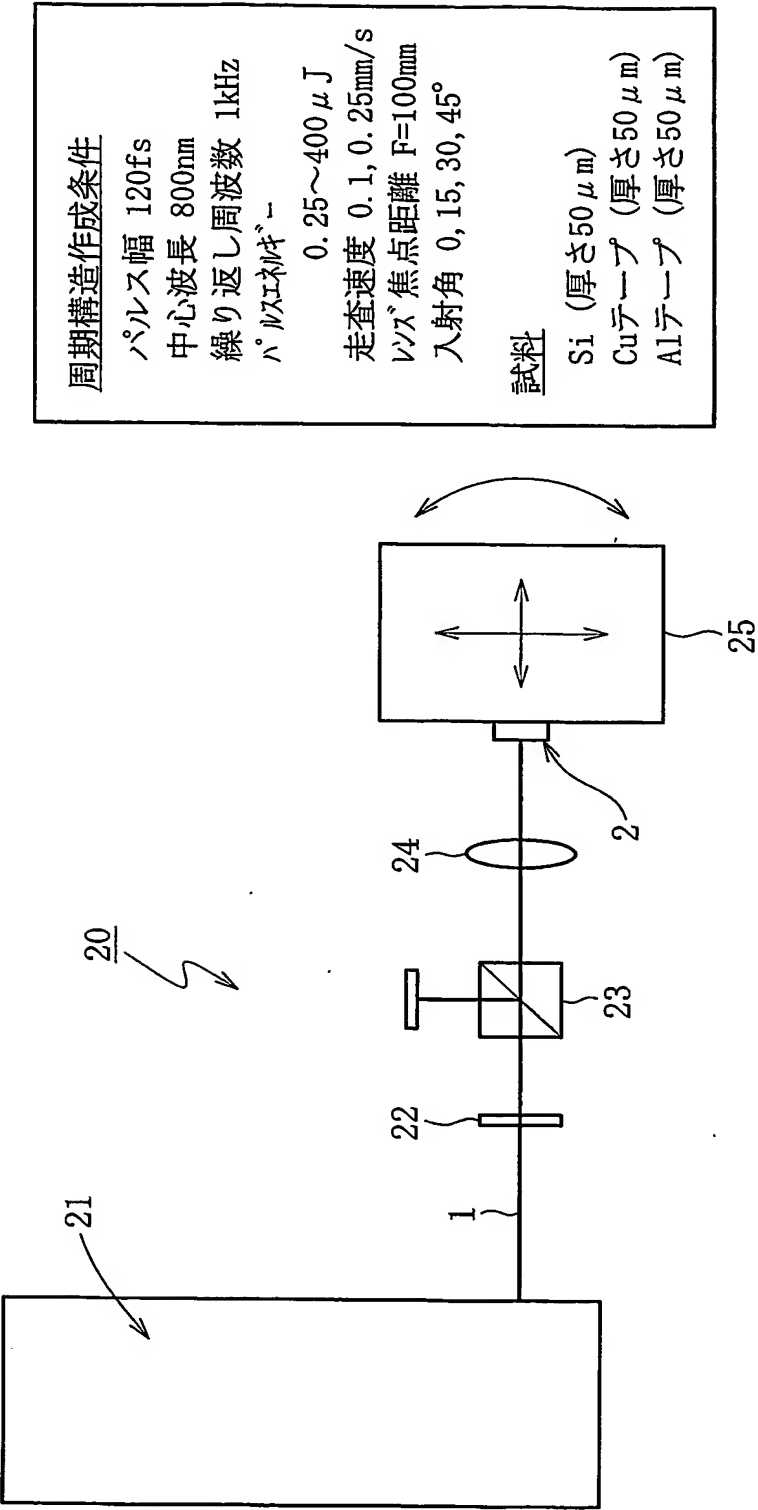


Fig. 2



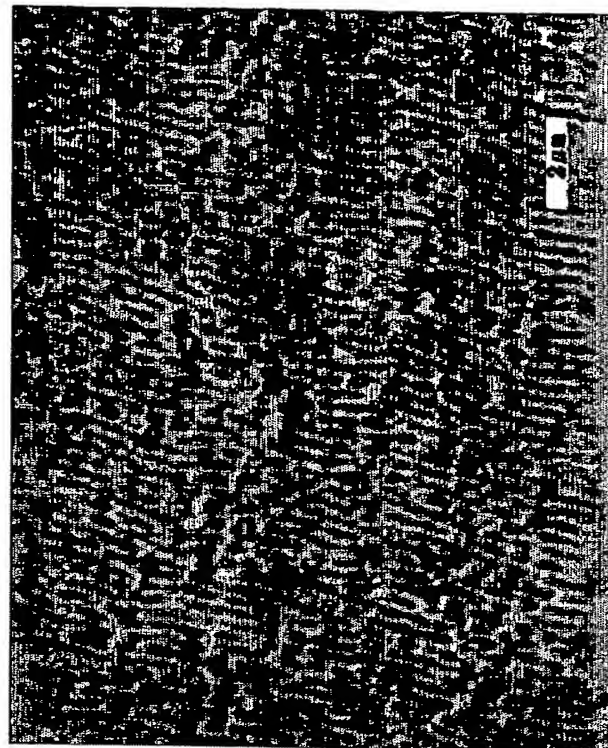


Fig. 3(b)

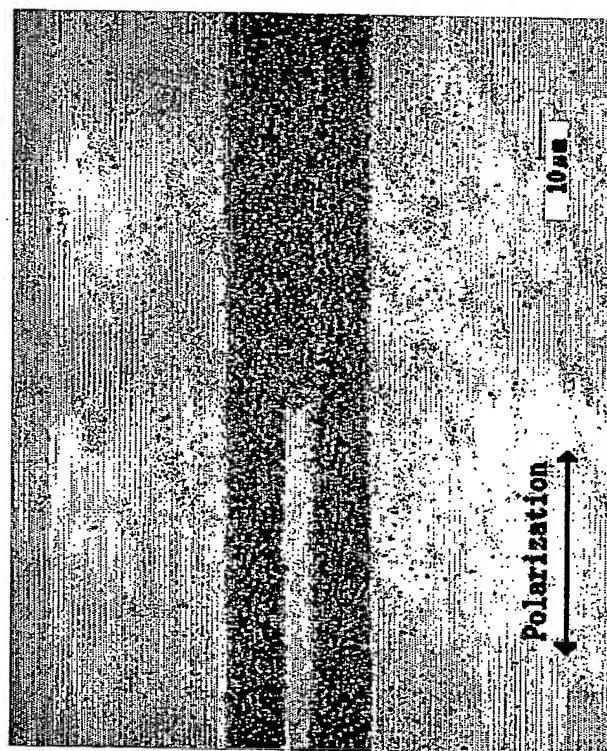


Fig. 3(a)

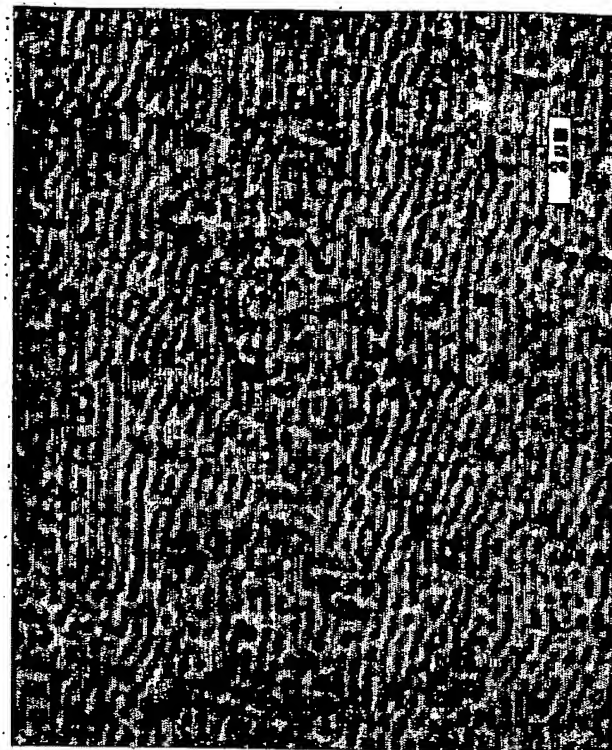


Fig. 4(b)

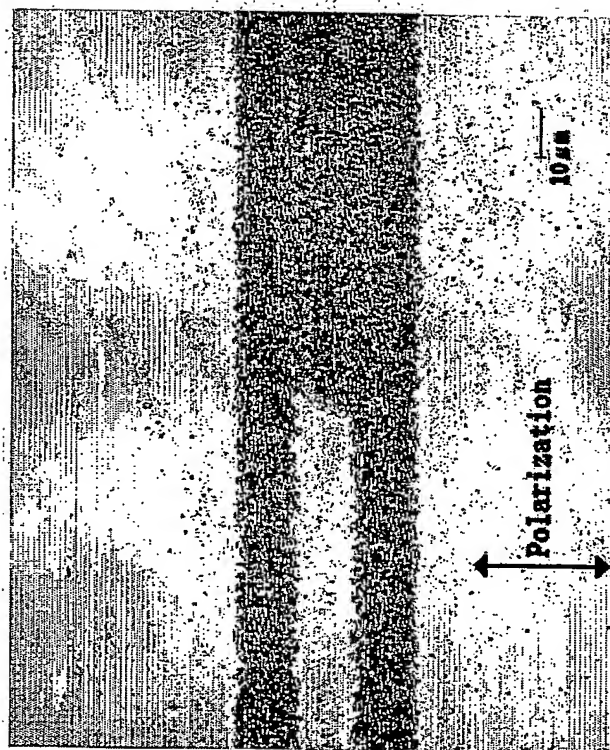
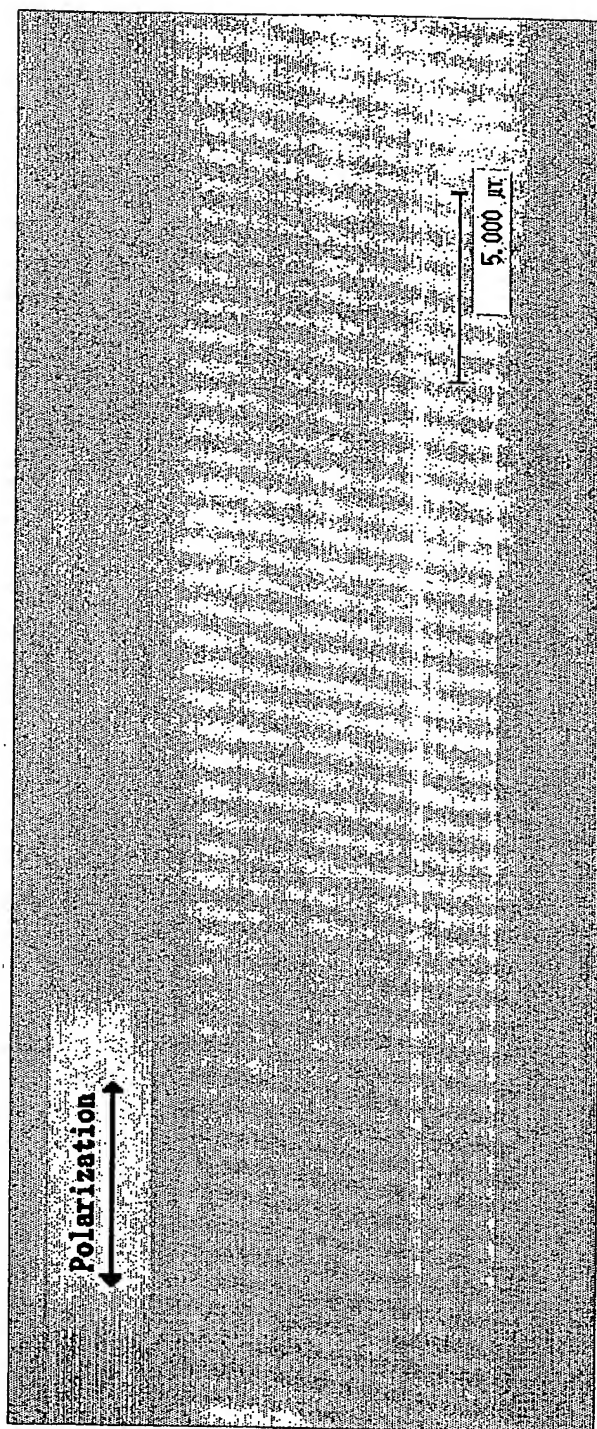


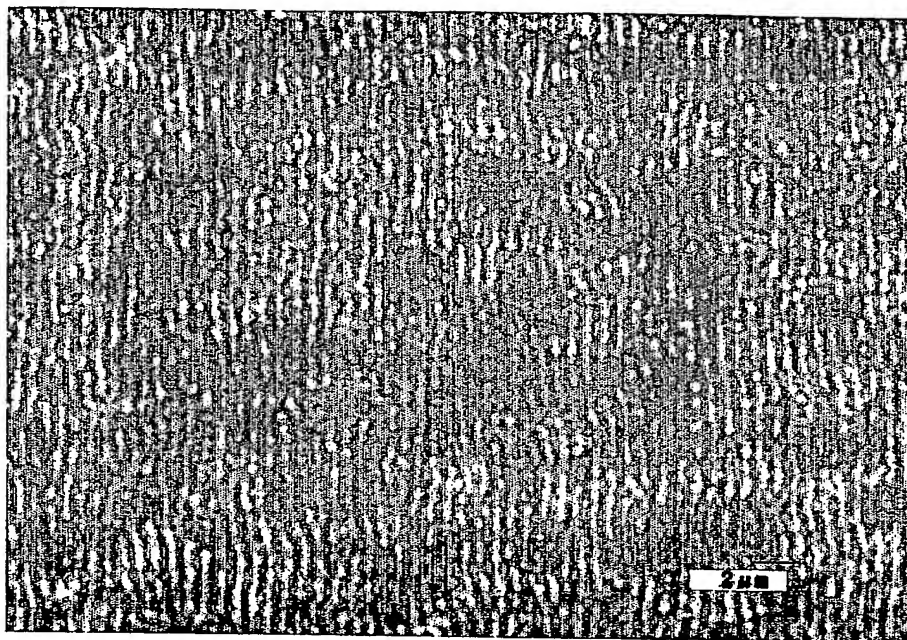
Fig. 4(a)



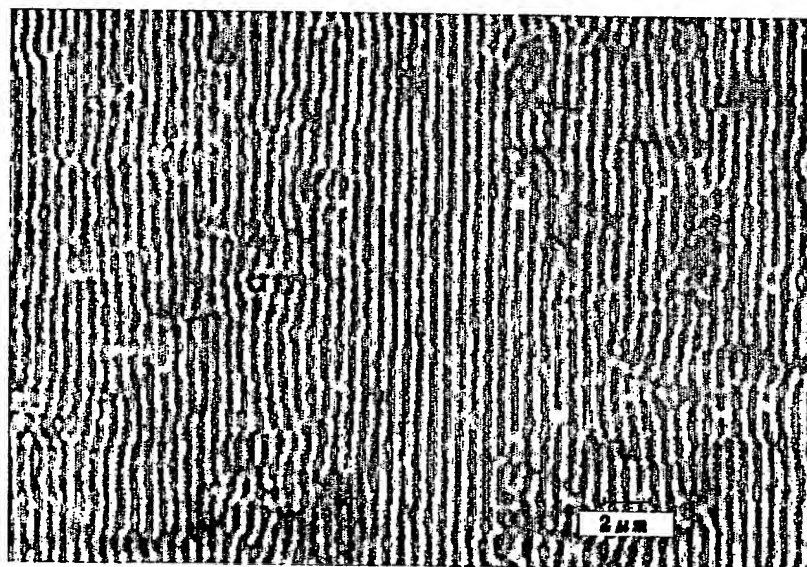
Fig. 5



**Fig. 6**



**Fig. 7**



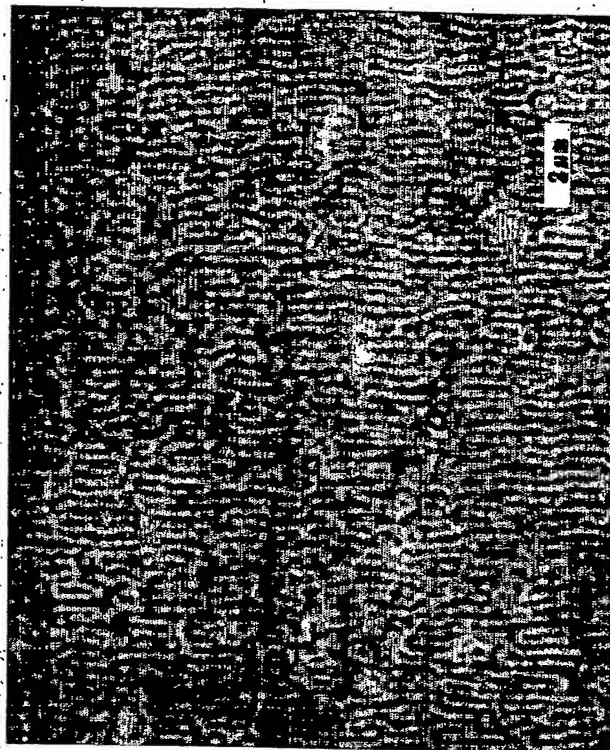


Fig. 8(b)

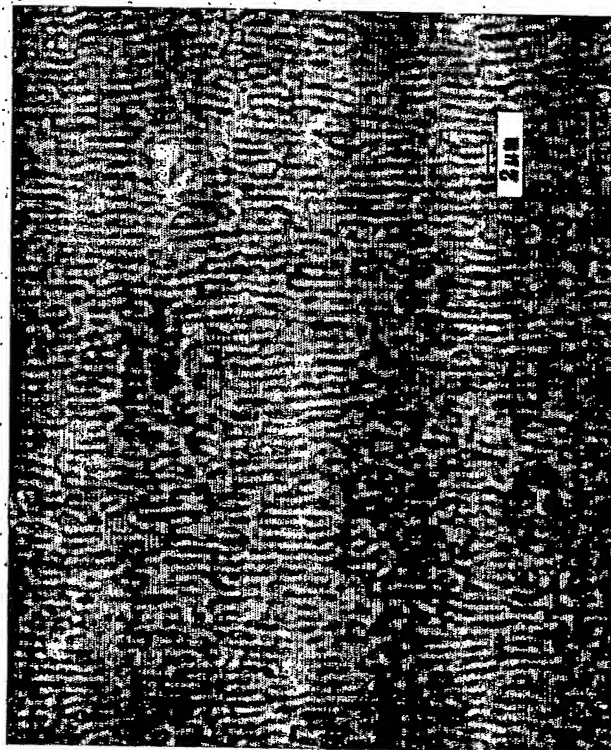


Fig. 8(a)

Fig. 9(a)

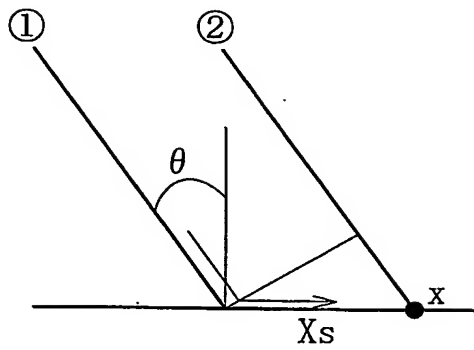


Fig. 9(b)

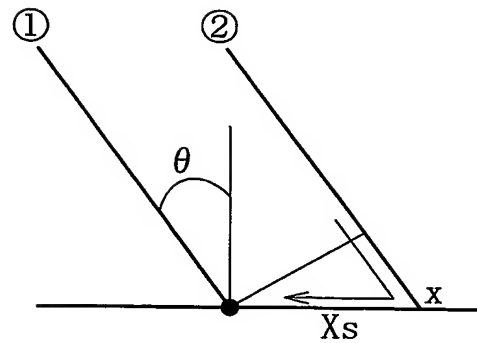
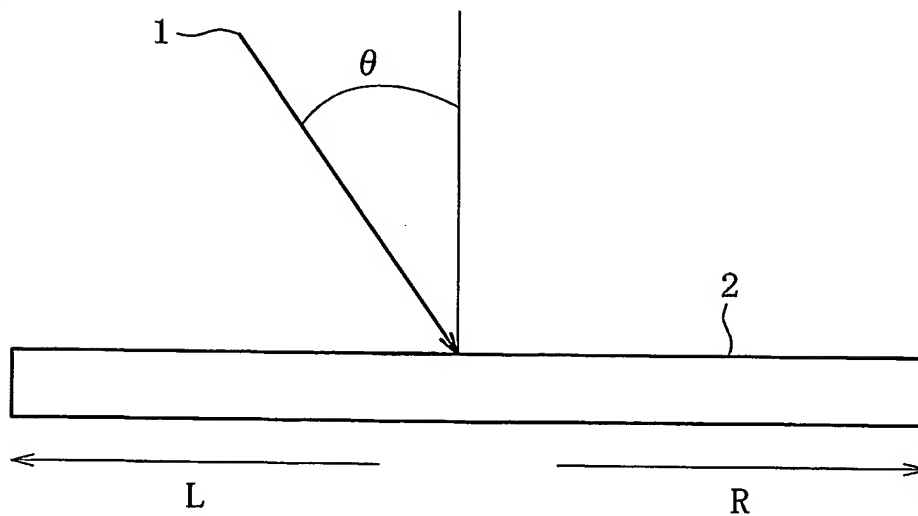


Fig. 10



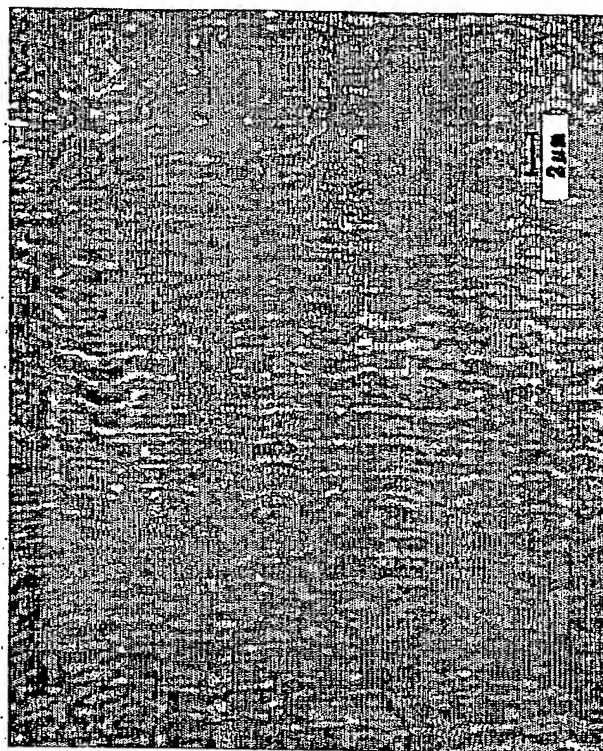


Fig. 11(b)

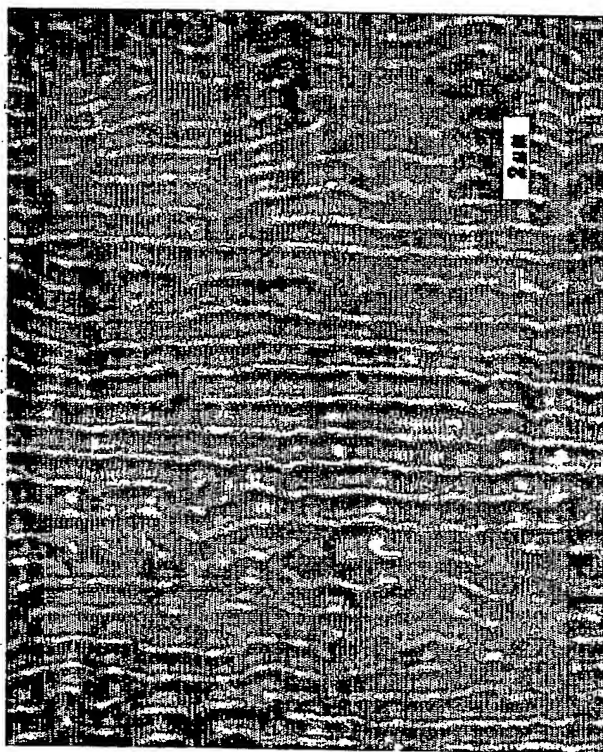


Fig. 11(a)



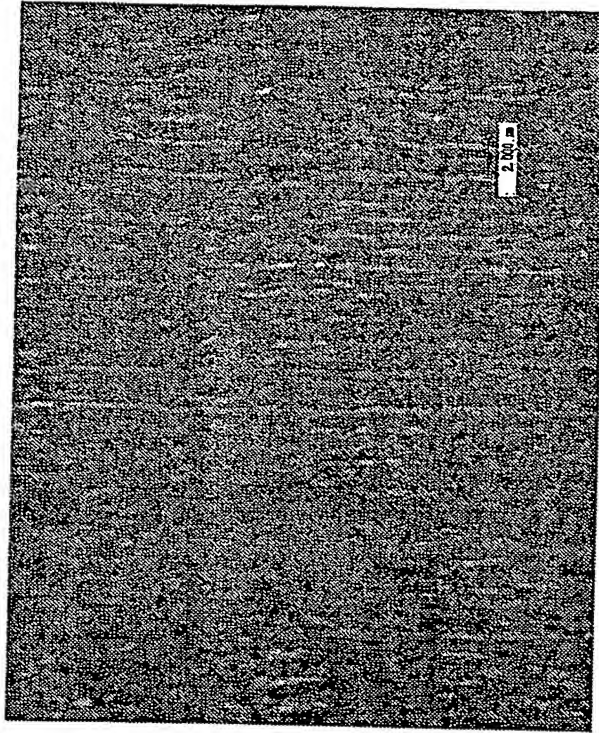


Fig. 12(b)

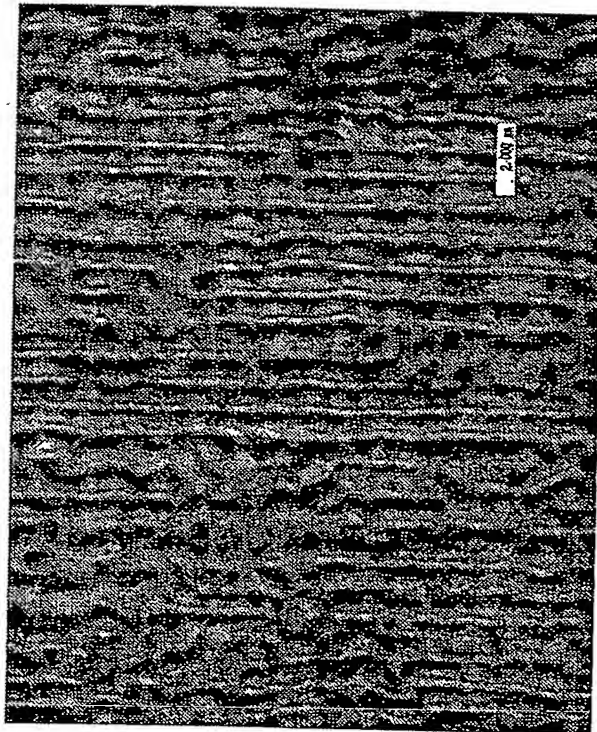


Fig. 12(a)

Fig. 13

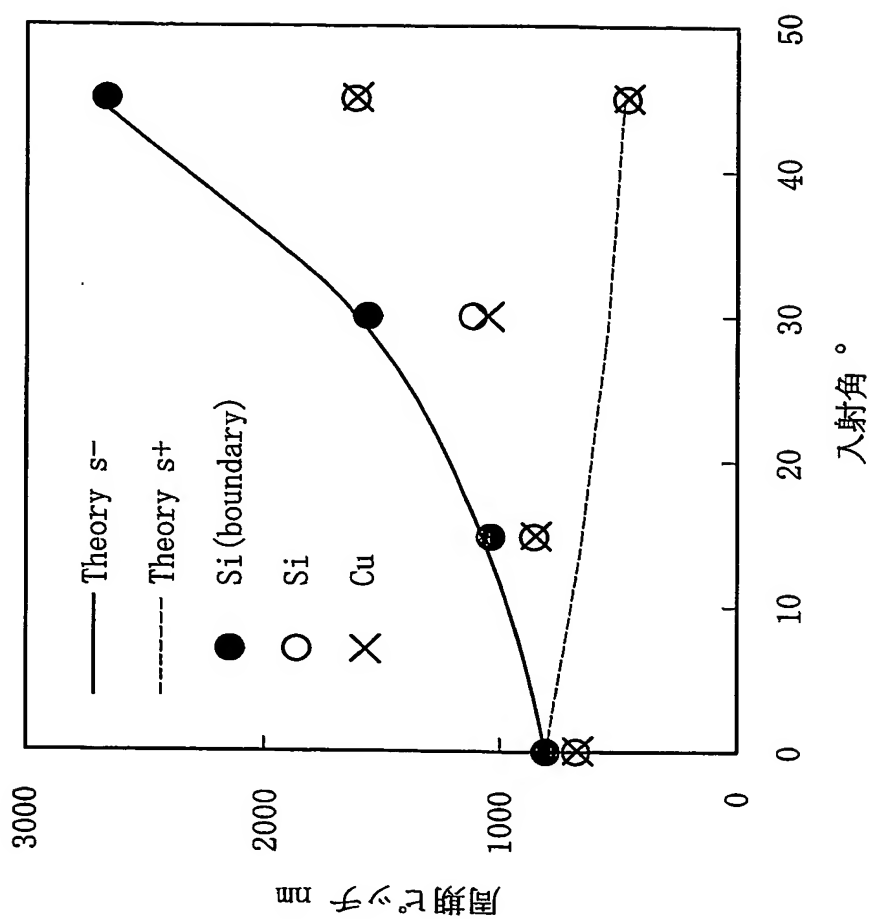


Fig. 14(b)

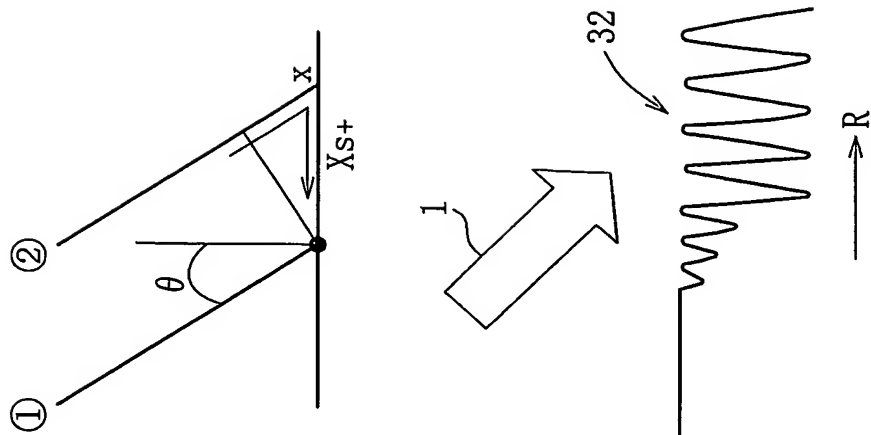


Fig. 14(a)

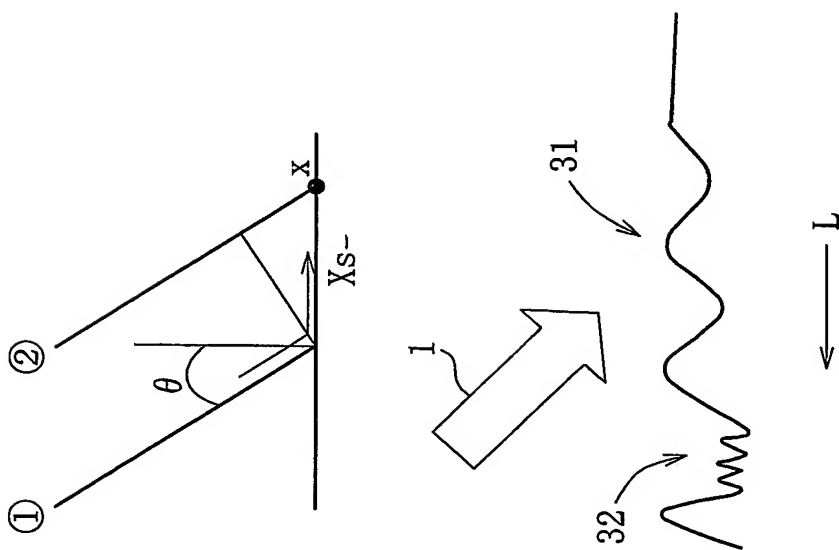




Fig. 15(a)

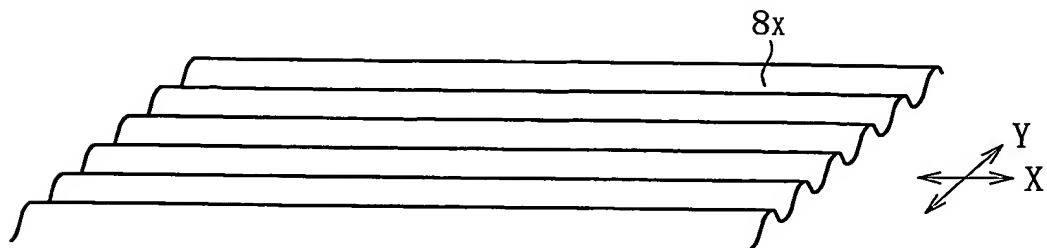


Fig. 15(b)

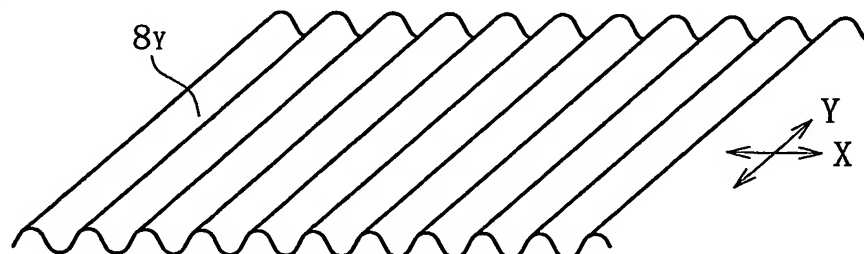


Fig. 15(c)

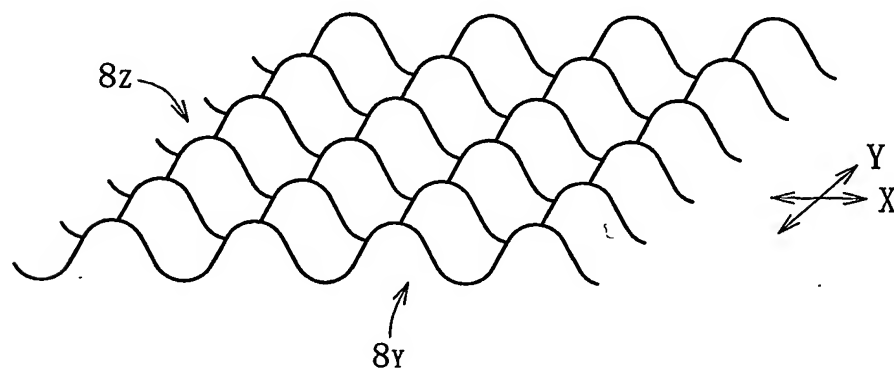


Fig. 15(d)

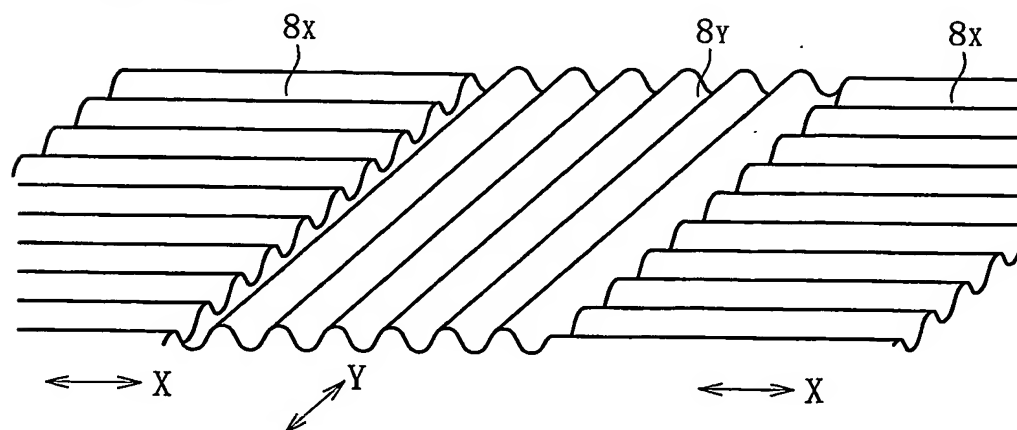


Fig. 16

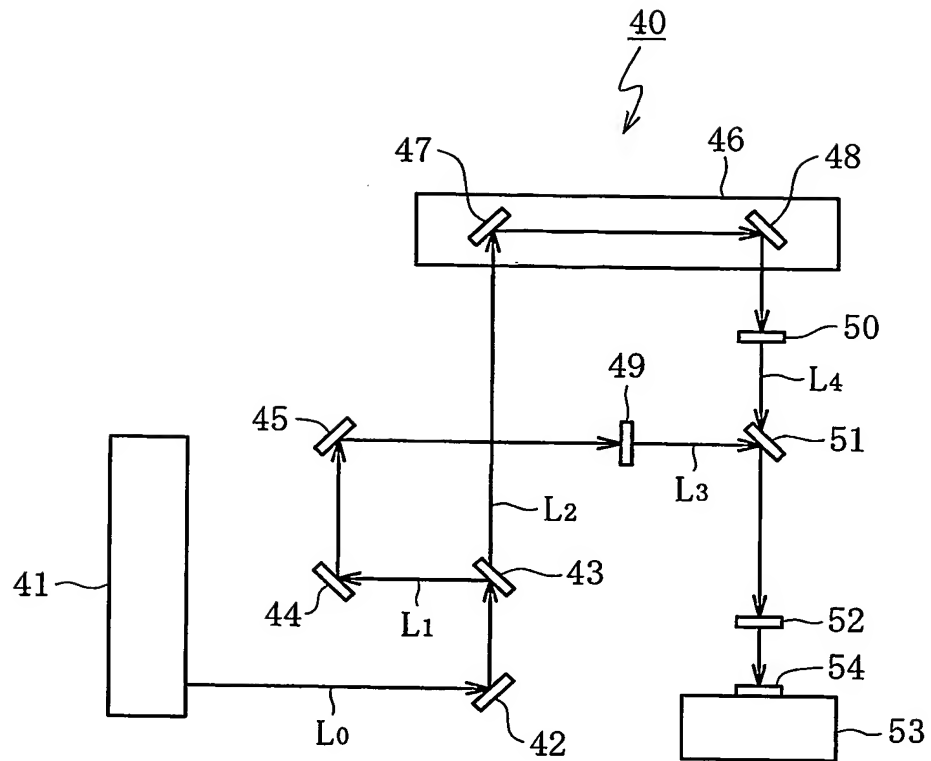


Fig. 17

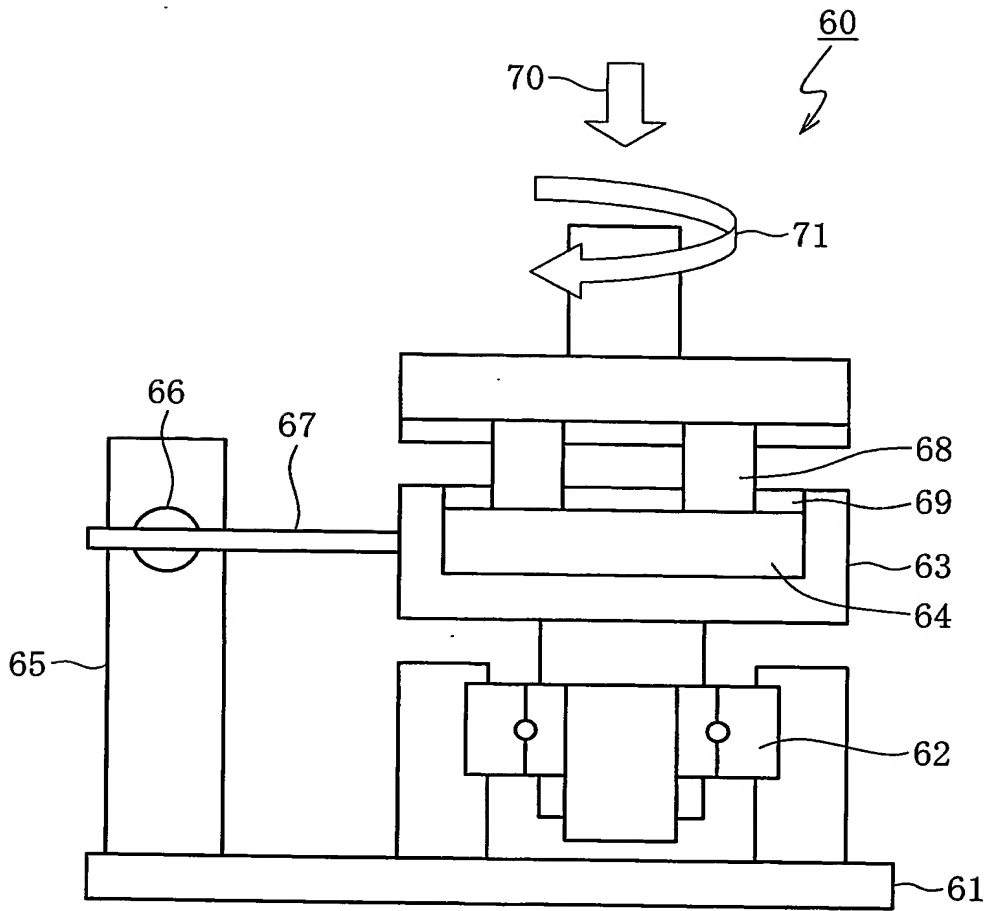


Fig. 18(a)

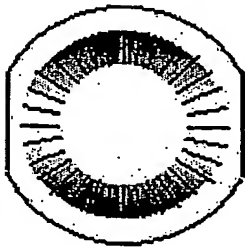


Fig. 18(b)

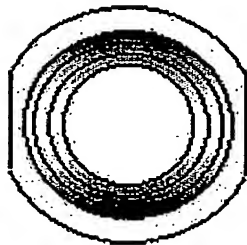


Fig. 18(c)

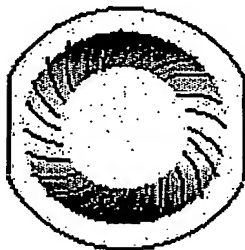


Fig. 18(d)

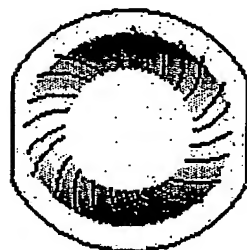


Fig. 19

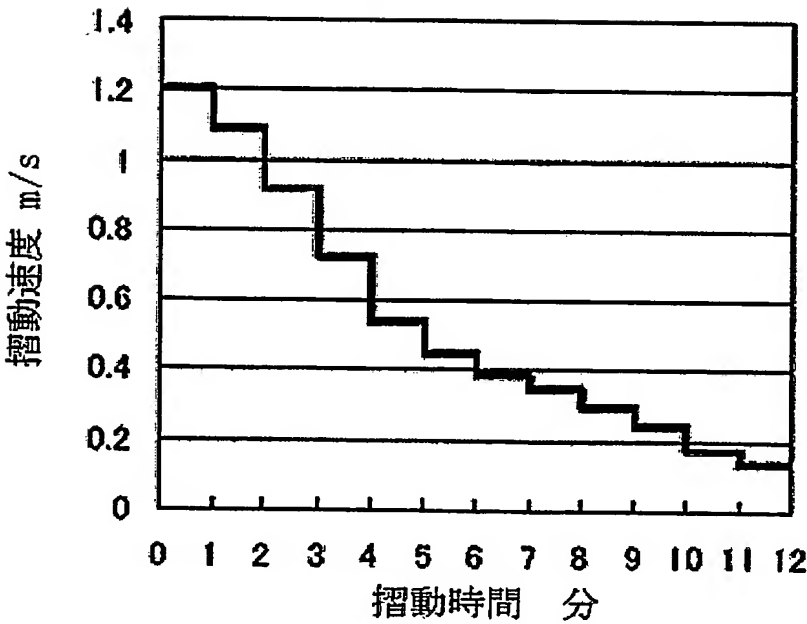


Fig. 20(a)

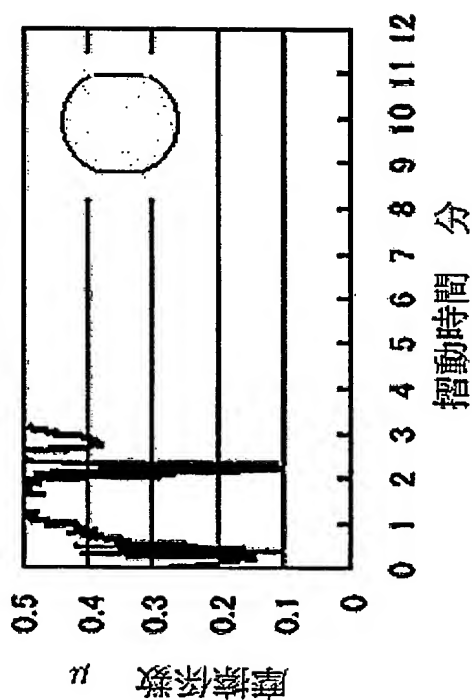


Fig. 20(c)

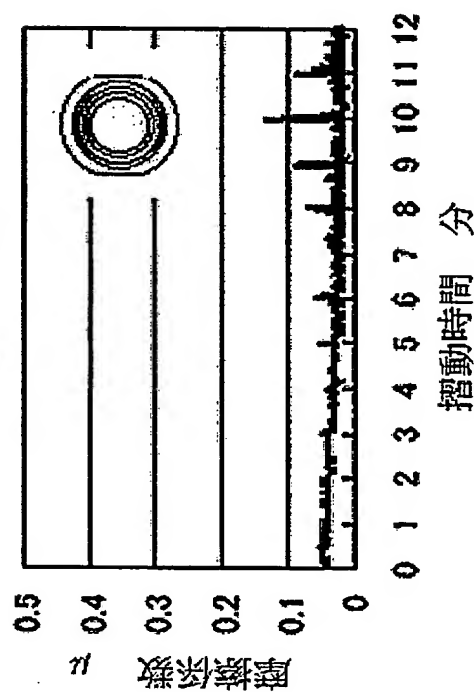


Fig. 20(b)

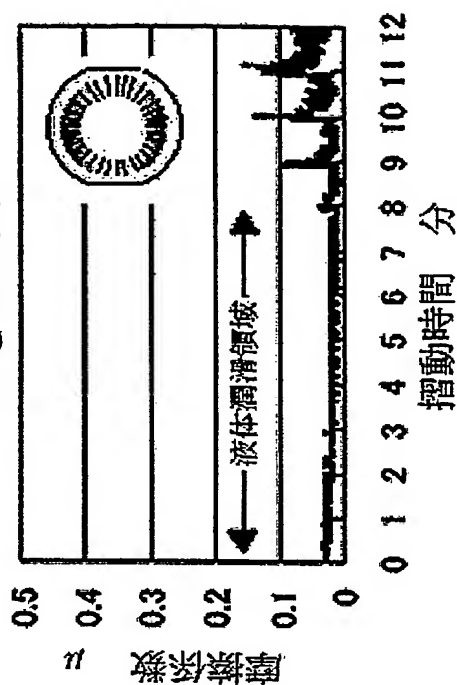
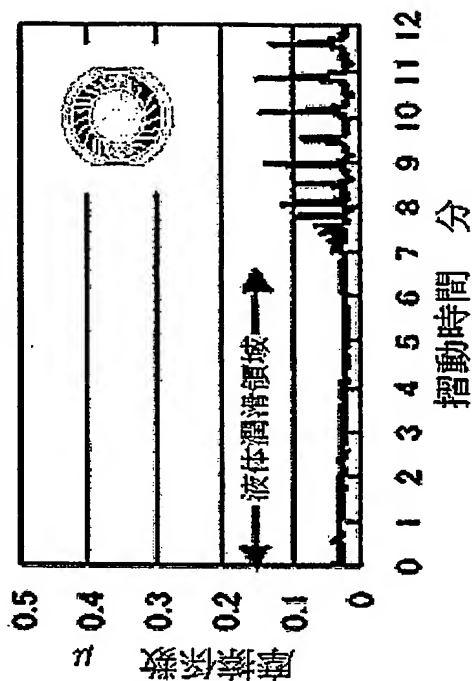


Fig. 20(d)



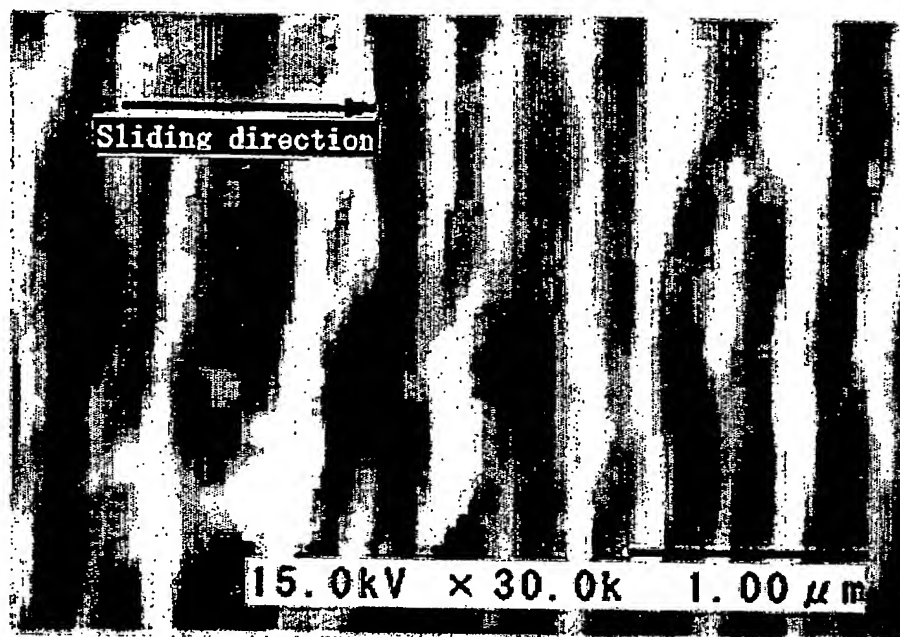
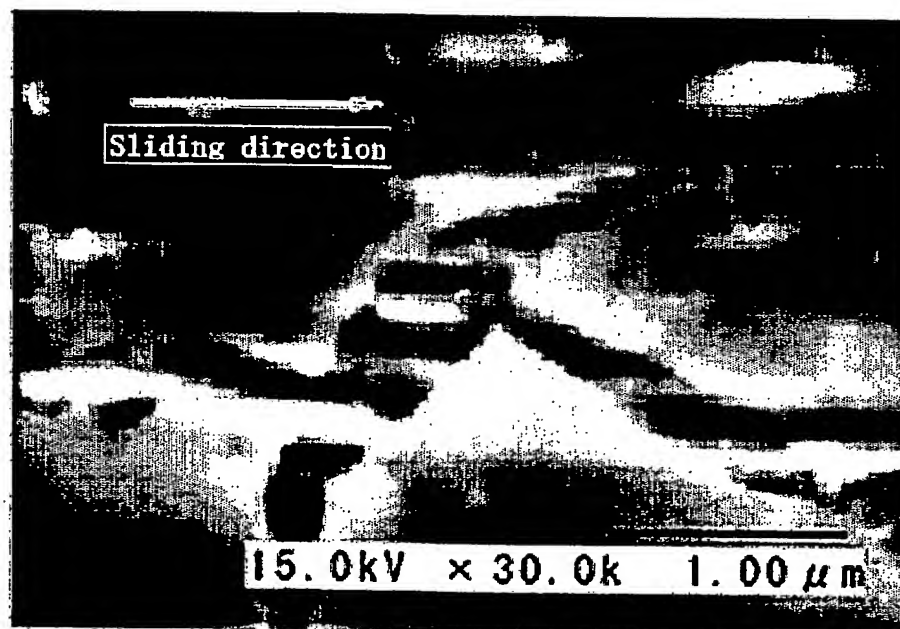
**Fig. 21(a)****Fig. 21(b)**

Fig. 22(a)

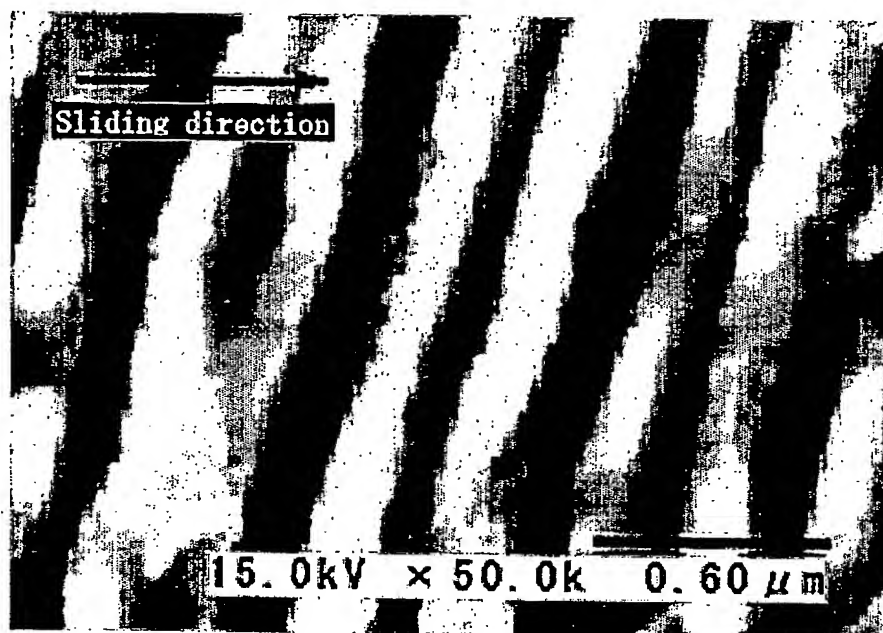


Fig. 22(b)

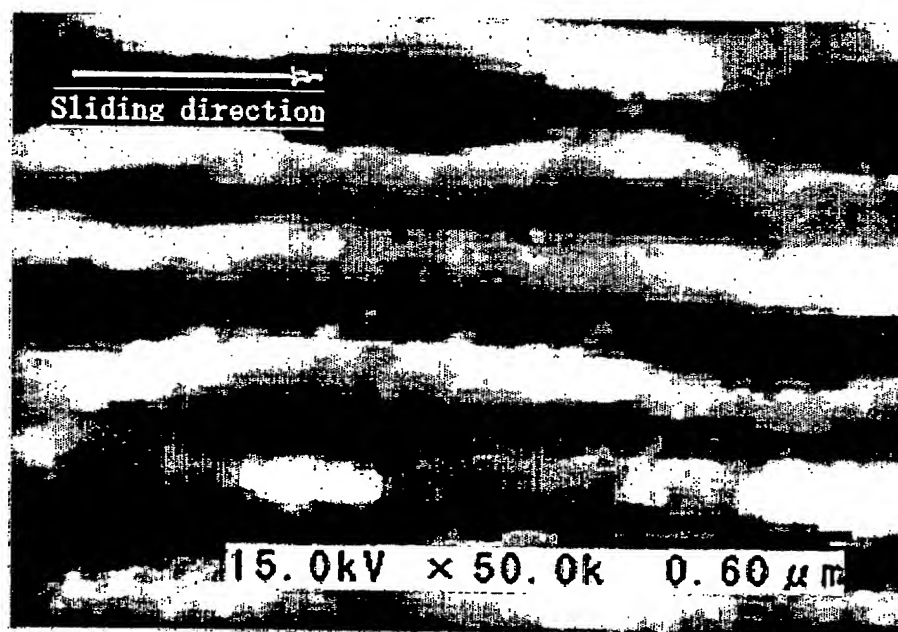


Fig. 23(a)

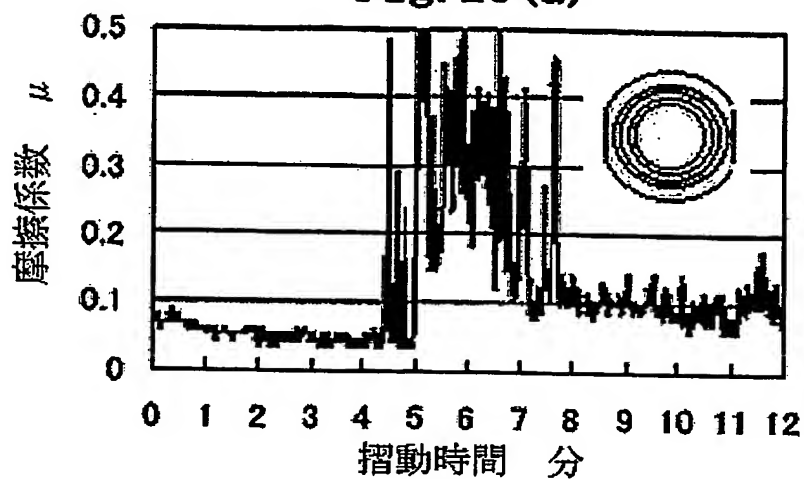


Fig. 23(b)

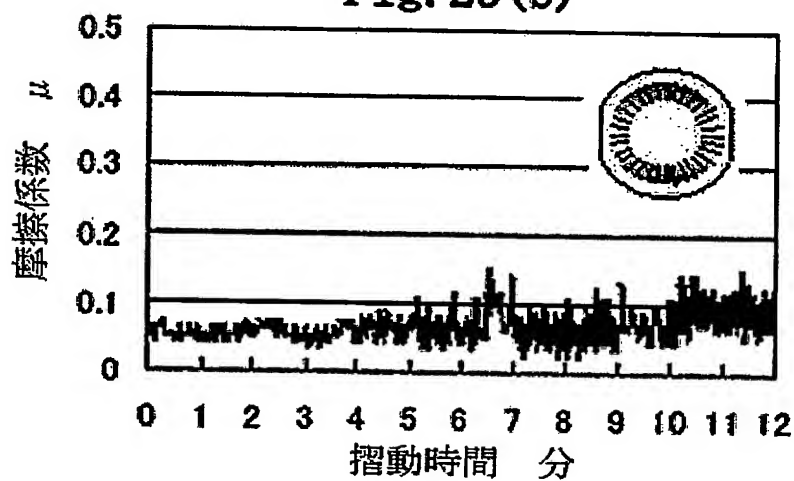
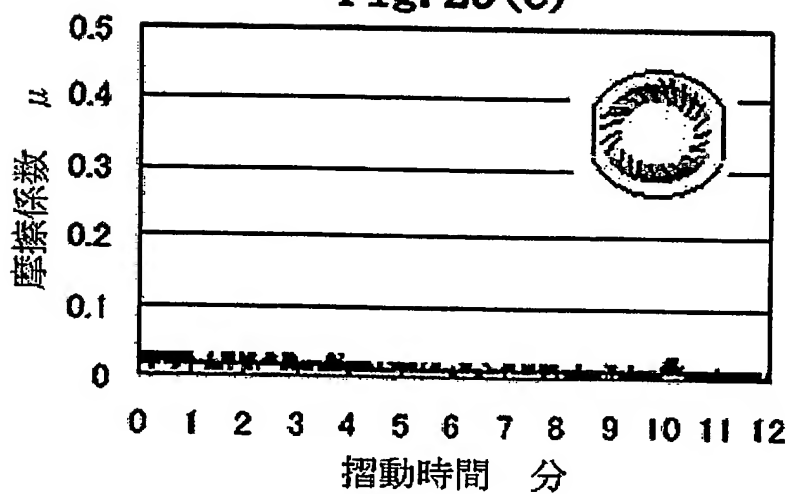


Fig. 23(c)



20/20



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP03/12308

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl<sup>7</sup> B23K26/00, C23F4/02

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl<sup>7</sup> B23K26/00, C23F4/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2004
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2004	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2004

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 6-212451 A (Osaka-Fu), 02 August, 1994 (02.08.94), Claim 1; Par. Nos. [0016] to [0019]; Fig. 1 (Family: none)	1-4, 6-8, 13-17 <u>5, 9-12</u>
<u>Y<sub>1</sub></u>		
X	JP 6-198466 A (Osaka-Fu), 19 July, 1994 (19.07.94), Claims 1, 6; Par. Nos. [0014] to [0026]; Figs. 1, 3, 5 (Family: none)	1-4, 6-8, 13-17 <u>5, 9-12</u>
<u>Y<sub>1</sub></u>		
Y <sub>2</sub>	JP 2-85350 A (Kawasaki Steel Corp.), 26 March, 1990 (26.03.90), Claims; page 2, lower right column, lines 10 to 18; page 3, left column, lines 14 to 18; Fig. 2 (Family: none)	5, 9-12

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
20 January, 2004 (20.01.04)

Date of mailing of the international search report  
03 February, 2004 (03.02.04)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

## A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl<sup>1</sup> B 23 K 26/00, C 23 F 4/02

## B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl<sup>1</sup> B 23 K 26/00, C 23 F 4/02

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年

日本国公開実用新案公報 1971-2004年

日本国登録実用新案公報 1994-2004年

日本国実用新案登録公報 1996-2004年

国際調査で使用了電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリ*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X Y <sub>1</sub>	J P 6-212451 A (大阪府) 1994. 08. 02, 【請求項1】, 【0016】 - 【0019】, 【図1】 (ファミリーなし)	1-4, 6-8, 13-17 5, 9-12
X Y <sub>1</sub>	J P 6-198466 A (大阪府) 1994. 07. 19, 【請求項1】, 【請求項6】, 【0014】 - 【0026】, 【図1】, 【図3】, 【図5】 (ファミリーなし)	1-4, 6-8, 13-17 5, 9-12

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリ

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&amp;」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

20. 01. 2004

国際調査報告の発送日

03. 2. 2004

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

鈴木 正紀

4 E

3 2 3 2

電話番号 03-3581-1101 内線 3423

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y <sub>2</sub>	J P 2-85350 A (川崎製鉄株式会社) 1990.03.26, 特許請求の範囲, 第2頁右下欄第10行~ 第18行, 第3頁左欄第14行~第18行, 第2図 (ファミリーな し)	5, 9-12

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☒ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**